



**Universidad Autónoma Metropolitana**  
**Unidad Azcapotzalco**

DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

**COMPORTAMIENTO ANTE CARGAS LATERALES DE MUROS  
DE MAMPOSTERÍA COMBINADA UNIDOS CON MORTEROS  
UTILIZADOS EN LA AUTOCONSTRUCCIÓN**

**T E S I S**

PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRO EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL**

**P R E S E N T A**

**VICTOR HUGO SALINAS VALLEJO**

DIRECTOR DE TESIS: **DR. ARTURO TENA COLUNGA**

MEXÍCO, D.F.

MAYO DE 2009

**A mis padres y hermanos,  
por su apoyo incondicional y a quienes debo lo que soy.**

# ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>CAPÍTULO 1</b>	
1. Antecedentes	4
1.1. Desarrollo de la mampostería	4
1.2. Modalidades de la mampostería más comúnmente utilizada en México	7
1.2.1. Mampostería confinada	7
1.2.2. Mampostería reforzada interiormente	8
1.2.3. Mampostería no confinada ni reforzada	9
1.2.4. Mampostería de piedras naturales	9
1.3. Mampostería combinada y confinada	10
1.3.1. Lugar de origen	10
1.3.2. Combinación más frecuentemente utilizada	11
1.3.3. Variantes en la combinación de hiladas	12
<b>CAPÍTULO 2</b>	
2. Determinación de las propiedades índice de los materiales utilizados	14
2.1. Propiedades de las piezas (bloques y tabiques)	14
2.1.1. Absorción	14
2.1.2. Absorción Inicial	15
2.1.3. Coeficiente de saturación	16
2.1.4. Resistencia a la compresión	17
2.1.5. Módulo de ruptura	19
2.1.6. Peso volumétrico	20
2.1.7. Fenómeno de la junta	20
2.2. Propiedades del mortero que utilizado en autoconstrucción	21
2.3. Propiedades índices del ensaye de pilas	24
2.4. Propiedades índices del ensaye de muretes	27
2.5. Energía de deformación	31
<b>CAPÍTULO 3</b>	
3. Resumen del ensaye de muros de mampostería combinada y confinada unidos con mortero Tipo I	34
3.1. Propiedades de las piezas	34

	<b>Índice</b>
3.2. Ensaye de pilas y muretes	35
3.3. Descripción de los muros	37
3.4. Modos de falla	37
3.4.1. Muro MCC-1	37
3.4.2. Muro MCC-2	38
3.5. Comportamiento histerético	39
3.6. Resistencia	39
3.7. Degradación de rigidez	39
3.8. Disipación de energía	40
3.8.1. Energía de deformación	40
 <b>CAPÍTULO 4</b>	
4. Predicción simplificada de la capacidad resistente y del modo de falla esperado	42
4.1. Estimación de las cargas de agrietamiento por un mecanismo de cortante	42
4.1.1. Muro MCC-3	42
4.1.2. Muro MCC-4	43
4.2. Estimación de la carga última por flexocompresión	43
4.3. Resistencia a compresión de los muros	44
4.4. Resistencia de diseño	45
 <b>CAPÍTULO 5</b>	
5. Ensaye experimental ante carga lateral de los muros de mampostería combinada unidos con mortero utilizado en la autoconstrucción.	46
5.1. Descripción	46
5.1.1. Construcción de los muros	46
5.1.2. Instrumentación	49
5.1.2.1. Instrumentación interna	49
5.1.2.2. Instrumentación externa	50
5.1.3. Ensaye experimental	51
5.2. Presentación y discusión de resultados	53
5.2.1. Construcción de los muros	53
5.2.1.1. Muro MCC-3	54
5.2.1.2. Muro MCC-4	54
5.2.2. Envolvente de la curva, carga lateral - distorsión	55
5.2.3. Degradación de rigidez	55

	<b>Índice</b>
5.2.4. Disipación de energía	57
5.2.4.1. Energía de deformación	57
5.2.4.2. Energía disipada equivalente	58
5.2.4.3. Energía histerética acumulada	59
5.2.5. Amortiguamiento viscoso equivalente	60
5.3. Índice de daño de Kwok y Ang	63
5.4. Patrones de agrietamiento	66
5.5. Criterios de aceptación de acuerdo a las NTCM-2004, para los muros presentados en esta investigación y comparación con muros descritos en el capítulo III	68
5.6. Comparación con resultados de muros construidos con mortero tipo I (descritos en el capítulo III)	70
5.6.1. Comportamiento histerético	71
5.6.2. Patrones de agrietamiento	74
5.7. Comportamiento del acero de refuerzo	75
<b>CAPÍTULO 6</b>	
6. Modelado simple de muros	82
6.1. Método de la columna ancha equivalente (Marco equivalente)	82
6.1.1. Muro MCC-3	84
6.1.2. Muro MCC-4	85
6.2. Modelo de la diagonal equivalente	87
6.2.1. Muro MCC-3	89
6.2.2. Muro MCC-4	91
<b>CAPÍTULO 7</b>	
Comparación con modelo histerético analítico	93
<b>CONCLUSIONES</b>	98
<b>APENDICES</b>	
A. Cálculo de las propiedades índice de los materiales de construcción	102
A.1. Resistencia del concreto	102
A.2. Resistencia del mortero utilizado	105
A.3. Peso volumétrico del mortero utilizado	108
A.4. Propiedades de las piezas de mampostería	109
A.5. Resistencias, módulos de elasticidad y de rigidez a corte de pilas y muretes	113

	<b>Índice</b>
B. Gráficas del ensaye de pilas y muretes	117
B.1. Pilas, primer arreglo	117
B.2. Pilas, segundo arreglo	120
B.3. Muretes, primer arreglo	123
B.4. Muretes, segundo arreglo	126
C. Determinación de los módulos de resiliencia y de tenacidad para pilas y muretes	129
C.1. Pilas, primer arreglo	129
C.2. Pilas, segundo arreglo	131
C.3. Muretes, primer arreglo	134
C.4. Muretes, segundo arreglo	136
<b>REFERENCIAS</b>	139

## **INTRODUCCIÓN**

El hombre se ha servido de las estructuras construidas con mampostería desde las primeras civilizaciones que poblaron la Tierra brindándoles protección y cobijo. Son tantas sus bondades, que hasta hoy en día se sigue utilizando.

En las primeras construcciones se utilizaban piedras, por su abundancia en el medio. Sin embargo, una de sus desventajas era su peso excesivo para trasladarlas de un lugar a otro.

Uno de los materiales que surge a partir de la necesidad de utilizar material más liviano y que fuera moldeable en la construcción fue el adobe, elaborado a base de arcilla y en ocasiones reforzado con fibras vegetales o paja. Con el adobe, al igual que con las piedras, se construyeron algunas de las estructuras más antiguas del mundo; este material se ha encontrado en construcciones muy antiguas en Grecia y en Roma.

De la cocción de arcillas en hornos surgen los tabiques de barro recocido, con mayores resistencias que los adobes. Su aceptación se debió a su durabilidad, su resistencia y a la estética que les brinda a las construcciones. Con un proceso más industrializado y con un control de calidad más elevado se elaboran en la actualidad ladrillos cerámicos con resistencias mayores con diversas formas y distintos colores, los cuales no requieren un acabado ya que poseen una textura agradable. Sin embargo su costo es mayor a los tabiques recocidos.

De igual forma se están fabricando bloques de concreto aligerado huecos o macizos con dimensiones mayores a las de los tabiques, con diferentes texturas y colores, que brindan otra alternativa para las construcciones de mampostería. Sin embargo, frecuentemente sus resistencias son bajas y no cumplen con las resistencias mínimas especificadas en las normas.

En la construcción de cualquier estructura elaborada con base en tabiques o bloques se requiere de algún tipo de mortero para la unión de las piezas que la forman, y así lograr un comportamiento en conjunto de la mampostería. Este mortero está elaborado con base en arena, cemento, agua y cal, y su resistencia dependerá de los proporcionamientos en volumen de los agregados que se utilicen.

En México las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (NTCM-2004) clasifican a los morteros dependiendo de su resistencia y de las cantidades de los agregados que se utilizan, sin embargo, en la autoconstrucción no se siguen los lineamientos de las normas, por no contar con supervisión ingenieril. Por lo general, estos morteros presentan una baja resistencia a la compresión, ya que su contenido en cal es muy elevado; sin embargo, su trabajabilidad y su adherencia es mejor, como se verá en capítulos posteriores.

En esta investigación se analizó el comportamiento de la mampostería combinada y reforzada con mortero que se utiliza en la autoconstrucción. Este tipo de mampostería se ha

extendido en gran parte de la República Mexicana, y se ha observado en regiones donde la actividad sísmica es frecuente.

El trabajo realizado consistió en el ensaye de dos muros de mampostería combinada sujetos a una carga lateral cíclica y una carga gravitacional constante. Cada uno de estos muros tenía un arreglo de piezas diferente, de acuerdo con las combinaciones observadas más comúnmente en diferentes regiones del país, figura 1 y figura 2.

Además, se ensayaron un total de 18 pilas y 18 muretes, para determinar la resistencia a la compresión y al corte, el módulo de elasticidad y el módulo de rigidez al corte de la mampostería combinada, figura 1 y figura 2.

A las piezas utilizadas en la construcción de los muros se les realizaron pruebas para determinar su resistencia a la compresión, su módulo de ruptura, su absorción y su coeficiente de saturación.

Sólo existe una investigación previa realizada a este tipo de mampostería (Tena *et al.* 2007, Juárez 2007, Salinas 2005), donde se analizó el comportamiento de la mampostería combinada con el uso de un mortero tipo I como lo marcan las NTCM-2004.

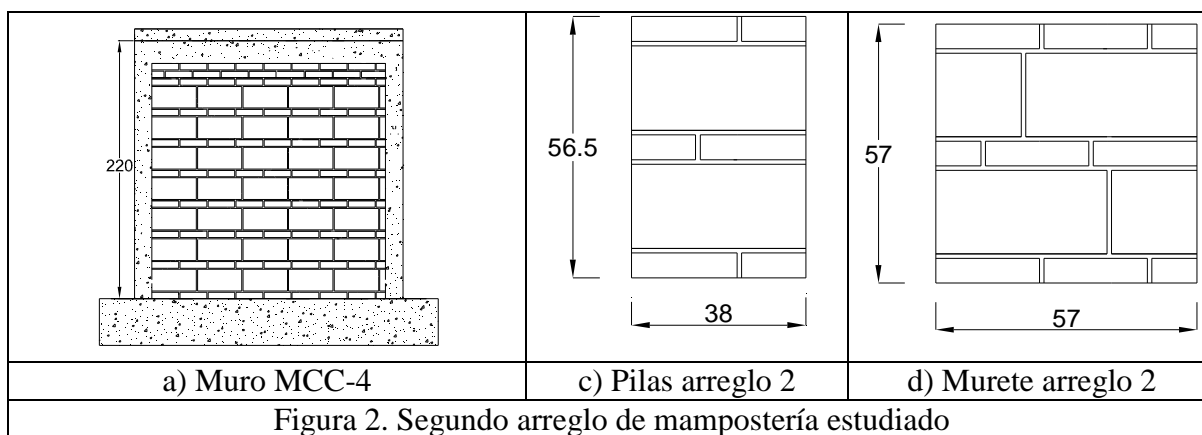
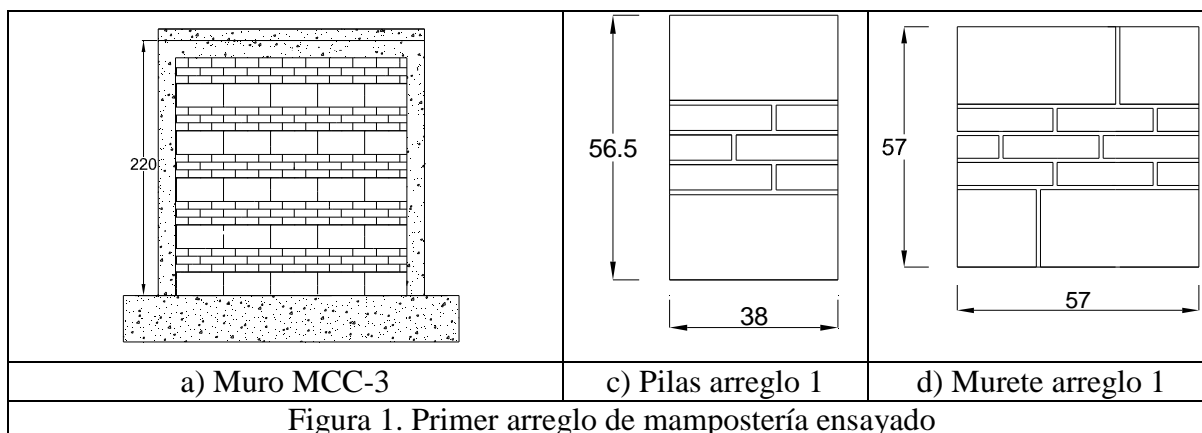
El propósito principal de esta investigación está enfocado a describir y analizar el comportamiento de la mampostería combinada y confinada unida con mortero que se usa en la autoconstrucción.

Se realiza una comparación del comportamiento de los muros de mampostería combinada fabricados previamente con mortero tipo I y los muros hechos con mortero que se usa en autoconstrucción (sin ninguna instrucción ingenieril), incluyendo resistencias nominales de morteros, pilas y muretes.

Finalmente, se concluye acerca de las ventajas o desventajas de usar este tipo de mortero y una reflexión sobre cuál arreglo de piezas parece más recomendable para la construcción de esta mampostería de acuerdo a los resultados experimentales obtenidos.



En la figura 1 y 2 se observa las combinaciones de cada uno de las probetas ensayadas



# ***1 ANTECEDENTES***

## **1.1 DESARROLLO DE LA MAMPOSTERÍA**

La mampostería ha sido utilizada desde el inicio de la humanidad y numerosas e increíbles construcciones de diversas civilizaciones se han realizado de esta forma y han perdurado hasta nuestros días.

El termino mampostería se refiere a un arreglo de material (piedras naturales o bloques) unidos mediante un cementante, esta unión es la que la diferencia de un apilamiento.

En los inicios las construcciones de mampostería se realizaban a base de piedras naturales por su abundancia en el medio, las rocas son consideradas el material más antiguo en la elaboración de la mampostería. Algunas de estas civilizaciones construían estructuras a base de piedras como muros y torres para su defensa también construían sus casas y caminos, figura 1.1



a) La gran Muralla China



b) Partenón, Grecia.



c) Machu Pichu, Perú.

Figura 1.1. Ejemplos de construcciones que se siguen preservando.

Los constructores comenzaron el labrado de las rocas con la finalidad de darles forma, para una mejor colocación de ellas, y poderlas utilizar en estructuras con diseños complejos. Sin embargo, el uso de rocas fue abandonándose paulatinamente, debido al trabajo que implicaba llevar las pesadas rocas hasta los lugares donde se encontraban las construcciones.

Se comenzó con la elaboración de bloques de arena o de arcilla estabilizado con orina, huevo, o sangre de algún animal y probablemente sea el primer material de construcción manufacturado. Dichos bloques tenían la cualidad de que podían construirse con las medidas o características geométricas necesarias para el diseño de la estructura.

Unas de las más antiguas e importantes construcciones con base en mampostería son probablemente los templos de Egipto (alrededor de 2700 A.C.), figura 1.2.e, donde el uso de bloques con base en arcilla o arena fueron utilizados debido a la abundancia en el medio, el uso de los bloques de arena como material de construcción comenzó a ser común, se dieron cuenta que la arena podía ser moldeada en bloques los cuales eran secados a la intemperie, los ladrillos realizados de lodo del río Nilo requerían de paja como un refuerzo para prevenir el agrietamiento, también la arcilla proveniente del río Nilo servía para rellenar las juntas entre las piezas y por lo tanto un mejor tipo de construcción fue obtenido.



d) Coliseo Romano



e) Pirámides de Egipto



f) Acueducto, Segovia,  
España

Figura 1.2. Construcciones que dan testimonio de la durabilidad de la mampostería.

Estas estructuras hacen darnos cuenta que los constructores de esa época o los antiguos ingenieros podían entender, por lo menos de una manera intuitiva como se efectuaba la transmisión de fuerzas de la estructura al suelo.

Cabe mencionar que Aristóteles fue quien explicó de manera correcta como los arcos soportan las cargas gravitacionales y Leonardo da Vinci explicó la teoría de las fuerzas internas entre los elementos de un arco.

Los ladrillos son probablemente el material de construcción manufacturado más antiguo que ha permanecido hasta nuestros días. Uno de los edificios con el cual se puede observar que este tipo de material ha perdurado hasta nuestros días y uno de los edificios más representativos del uso de los ladrillos es el edificio Monadnock en Chicago, figura 1.3, el cual está construido con mampostería no reforzada; sin embargo, el uso de muros con un espesor muy grande es notorio. Esta condición permaneció durante 50 años hasta que el uso de la mampostería reforzada comenzó.

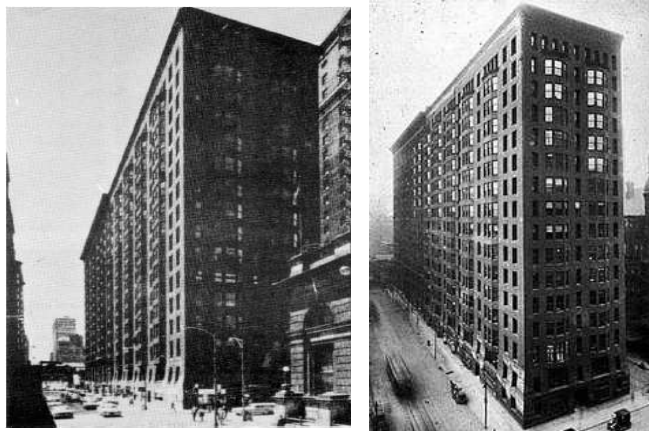


Figura 1.3. Edificio Monadnock, Chicago 1981.

A Marc Brunel se le da el crédito de ser el pionero en el uso de la mampostería reforzada (Sahlin 1971). Apparently, él concibió la idea en 1813; sin embargo, no la puso en práctica sino hasta 1825, así mismo él comenzó y dirigió un programa para la investigación acerca de la influencia del acero de refuerzo en el comportamiento estructural de la mampostería. Estas investigaciones fueron complementadas con investigaciones de otros ingenieros.

Para 1923, debido a dificultades económicas y bajo la secretaría de A. Brebner, del departamento de Obras públicas del Gobierno de India se buscaron alternativas más económicas en la construcción de estructuras y se publicó un reporte, describiendo una serie de pruebas extensas realizadas a la mampostería, las cuales tomaron mas de dos años en terminar (Sahlin 1971). Se dice que este reporte marcó el comienzo del desarrollo moderno de la mampostería. Es de destacar este reporte, ya que incluía una teoría de diseño racional, el cual comenzó a usarse en edificaciones construidas en países en los cuales los sismos son recurrentes (Japón, la India), ingenieros de estos países encontraron que la mampostería adecuadamente construida, ofrece una excelente resistencia para fuerzas sísmicas.

Para esos años las aplicaciones de la mampostería incluían estructuras públicas y privadas, chimeneas, puentes y edificios (Sahlin 1971).

En la actualidad, en nuestro país la construcción de viviendas ha tenido un incremento importante en los últimos años y se ha convertido en la actividad más importante de la industria de la construcción a nivel nacional.

La mayor parte de las edificaciones en nuestro país, en particular las destinadas a la vivienda están construidas con base en mampostería.

Un comportamiento satisfactorio de las estructuras de mampostería está relacionado con el buen desempeño de sus muros. Por lo tanto, se requiere usar una mampostería de buena calidad cuyos componentes (bloques, tabiques y mortero) cumplan con los requisitos mínimos que marcan las normas establecidas para su fabricación, así como ejecutar adecuadamente las especificaciones y recomendaciones para las distintas modalidades de mampostería que se construye.

La finalidad de los muros de mampostería no sólo es de tipo estructural, sino también para hacer subdivisiones de espacios, protección contra fuego, aislamiento térmico, acústico, apariencia estética, etc. Puede decirse entonces que la mampostería es apreciable por su color, forma, textura, durabilidad y por su bajo costo, en comparación de otros materiales.

Uno de los componentes principales de la mampostería es el mortero con el cual se unen las piezas. El mortero juega un papel muy importante, ya que es el encargado de que la mampostería trabaje como un conjunto para resistir fuerzas gravitacionales y fuerzas sísmicas.

Los reglamentos establecen requerimientos del mortero, incluyendo la clasificación del mortero y detalles de su uso. La calidad del mortero es obviamente importante en la integridad estructural de la mampostería. Es importante observar que mientras la integridad estructural de las piezas depende principalmente de su manufactura, la calidad del mortero terminado y su integridad estructural depende directamente de la habilidad del albañil, ya que es él quien lo elabora y hace la colocación las piezas.

En nuestros días se han encontrado teorías modernas de diseño de estructuras de mampostería basadas en pruebas de laboratorio, evaluaciones de nuevas teorías y resultados experimentales en forma de modernos reglamentos de construcción.

## 1.2 MODALIDADES DE MAMPOSTERÍA MÁS COMÚNMENTE UTILIZADA EN MÉXICO

Las Normas Técnicas Complementarias de Estructuras de Mampostería (NTCM-2004) definen como muros diafragma a aquellos muros que se encuentran rodeados por vigas y columnas de un marco estructural al que proporcionan rigidez ante las cargas laterales, dichos muros pueden ser: mampostería confinada, mampostería reforzada interiormente, mampostería no reforzada o mampostería de piedras naturales, en todos los casos el espesor de los muros de mampostería no deberán de ser menores a 10 cm.

### 1.2.1 Mampostería confinada

Es un tipo de mampostería que se encuentra rodeada por elementos estructurales de concreto reforzado (castillos y dalas), los cuales cumplen con los requisitos geométricos y de refuerzo, definidos en la sección 5.1.1 a 5.1.4 de las Normas Técnicas Complementarias de Estructuras de Mampostería (NTCM-2004), las cuales se resumen en la figura 1.4.

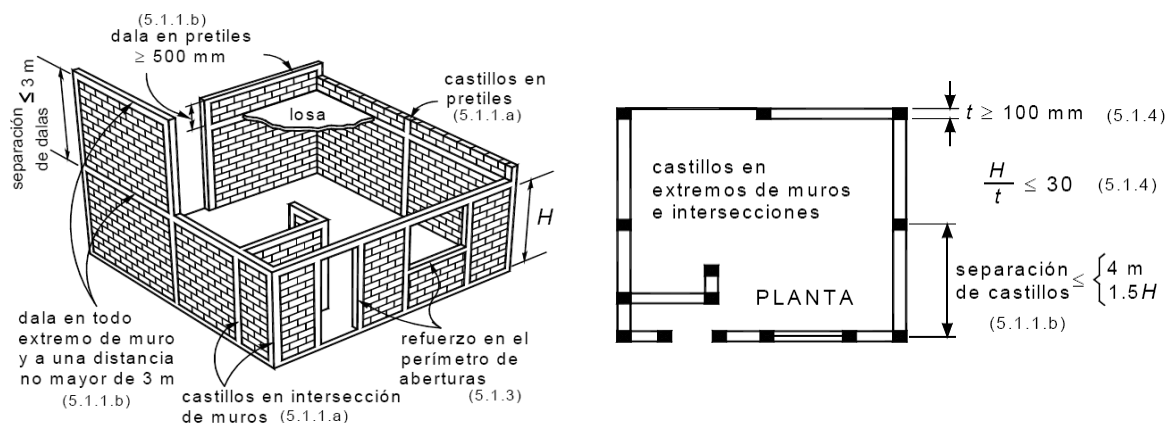


Figura 1.4. Requisitos para mampostería confinada (NTCM-2004).

donde las dalas y los castillos exteriores deberán cumplir los requisitos siguientes, figura 1.5.

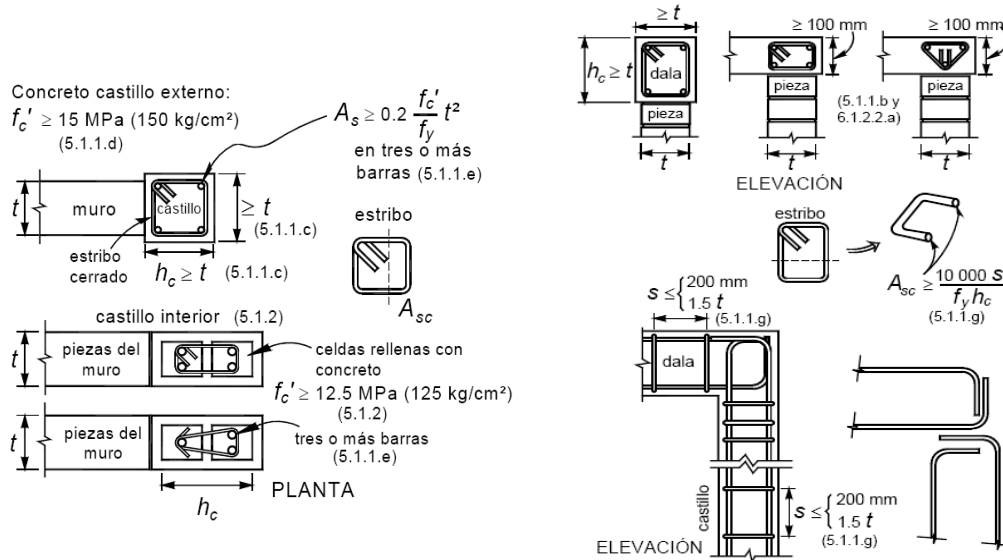


Figura 1.5. Requisitos para castillos y dalas (NTCM-2004)

Las normas establecen recomendaciones como separaciones máximas de castillos, confinamiento de huecos para ventanas, anclaje de refuerzo longitudinal en las hiladas del muro y todo lo necesarias para garantizar un desempeño adecuado de este tipo de mampostería.

### 1.2.2 Mampostería reforzada interiormente

Como su nombre lo indica, son muros reforzados con alambres o barras de acero corrugado colocados en los huecos de las piezas y entre las juntas de las piezas. Estos muros deberán de cumplir con los requisitos 6.1.1 a 6.1.9. de las NCTM-2004. En las figuras 1.6 y 1.7 se observan los requisitos que debe de cumplir esta mampostería.

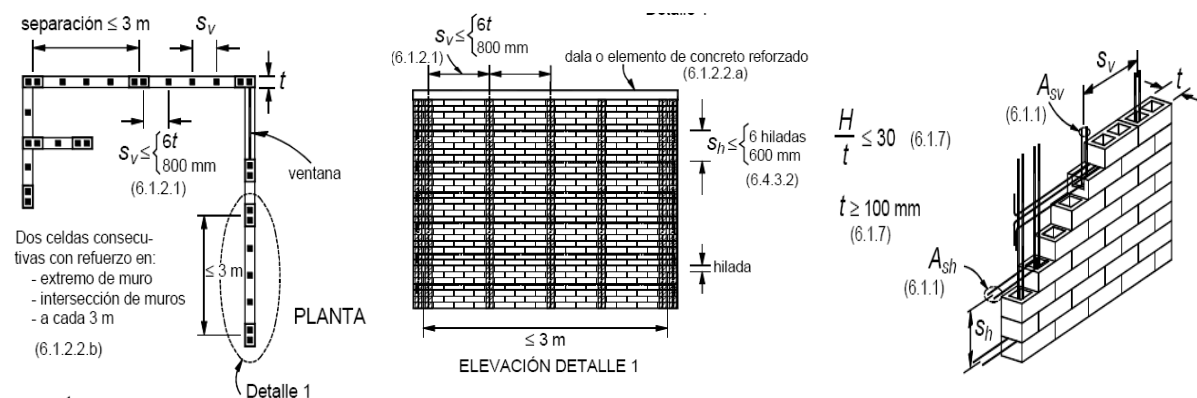
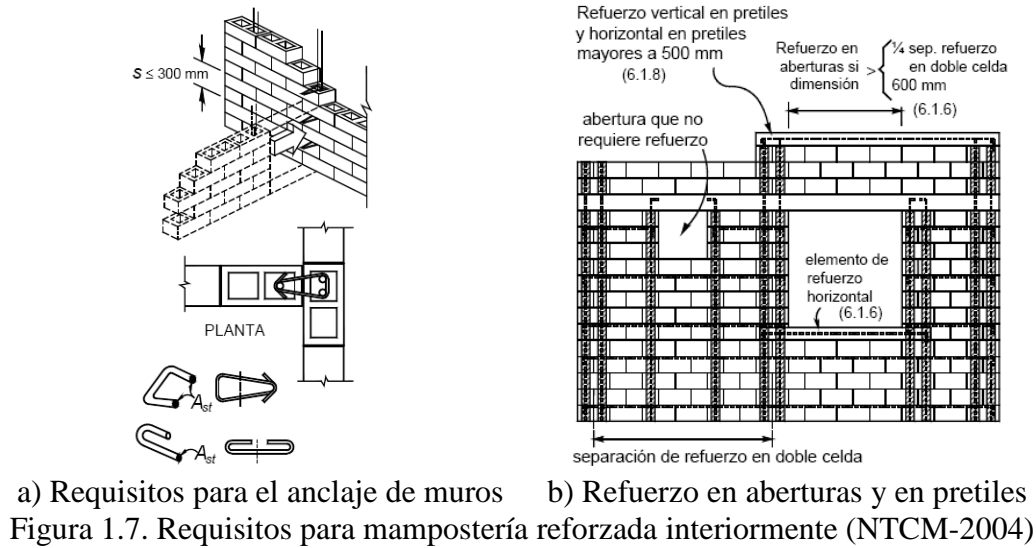


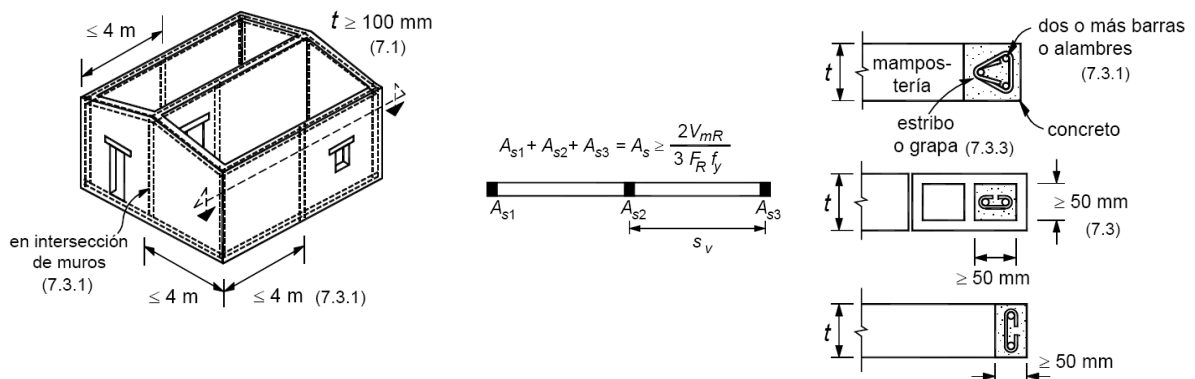
Figura 1.6. Requisitos para mampostería reforzada interiormente (NTCM-2004)



### 1.2.3 Mampostería no confinada ni reforzada

Esta es una mampostería que aun contando con algún tipo de refuerzo no posee el refuerzo necesario para ser considerada como una mampostería como las anteriores.

Sin embargo, las normas indican el empleo de un refuerzo mínimo por integridad estructural, con el fin de que la mampostería tenga una mayor redundancia y para mejorar la capacidad de deformación de la misma. En la figura 1.8 se muestran los detalles del refuerzo por integridad estructural para una estructura de mampostería.



### 1.2.4 Mampostería de piedras naturales

Este tipo de mampostería se refiere a aquella que es construida con piedra natural con o sin labrar y unida con mortero. Las piedras no labradas se utilizan en cimientos, muros de retención y algunos otros elementos de mampostería clasificada como de tercera.

Conforme a las NTCM-2004, las piedras naturales que se utilicen en la elaboración de esta mampostería deberán de tener una resistencia mínima en su dirección paralela y en su dirección perpendicular a su plano de formación y se deberán evitar piedras con formas redondeadas y cantos rodados.

### 1.3 MAMPOSTERÍA COMBINADA Y CONFINADA

Es una modalidad de mampostería que parece tener sus antecedentes en las antiguas civilizaciones del Mediterráneo donde se intercalaban piedras naturales con ladrillos (por ejemplo, Turquía) y que actualmente se está construyendo en diversas regiones de México donde los sismos son frecuentes. La modalidad que actualmente se construye en México es una mampostería confinada mediante castillos y dalas pero tiene la peculiaridad de estar formada con combinaciones de bloques sólidos ligeros (en lugar de piedras naturales labradas) y tabiques de barro recocido.

Una de las ventajas evidentes de este tipo de mampostería es su aspecto, ya que por tener una apariencia agradable no necesariamente necesita de un repellado en el exterior de los muros. Otra ventaja que surge a partir del uso de bloques de concreto ligeros y las dimensiones que posee, es el avance significativo en la elaboración de estructuras construidas con este material a diferencia de construcciones elaboradas con un solo tipo de piezas de dimensiones mucho menores (tabiques de barro recocido).

#### 1.3.1 Lugar de Origen

Uno de los primeros lugares donde fue observada esta variante modernizada de mampostería combinada fue en Cholula, Puebla, lugar en el cual numerosas casas están construidas con este tipo de mampostería y es aquí donde se encuentran gran cantidad de fabricantes de tabiques y bloques. Al hacer un recorrido por este lugar, se observó que no solamente casas habitación se estaban construyendo, sino también naves industriales edificios de tres niveles y moteles figura 1.9 a figura 1.11.



a) Casas habitación, Cholula, Puebla



b) Casa habitación, Tlaxcala.

Figura 1.9. Estructuras construidas con mampostería combinada





c) Edificios de tres niveles, Cholula, Puebla.



d) Naves industriales, Cholula, Puebla

Figura 1.10. Estructuras construidas con mampostería combinada



e) Moteles Teziutlán, Puebla



f) Bardas, Cholula, puebla

Figura 1.11. Estructuras construidas con mampostería combinada

### 1.3.2 Combinación más frecuentemente utilizada

El aparejo mas utilizado en la elaboración de este tipo de mampostería es el que se muestra en las siguientes figuras 1.12 a figura 1.14, consta de tres hiladas de tabique por una de bloque. Este arreglo se encontró muy frecuentemente en Cholula, Puebla, y en numerosos poblados de Tlaxcala. Uno de los principales motivos de que sea muy frecuente es por que tres hiladas de tabique corresponden a una hilada de bloque, por consiguiente, se puede tener una eficiente colocación de las piezas.



Figura 1.12. Combinación de bloques y tabiques más frecuentemente utilizada en las construcciones



Figura 1.13. Combinación de bloques y tabiques más frecuentemente utilizada en las construcciones



Figura 1.14. Combinación de bloques y tabiques más frecuentemente utilizada en las construcciones

### ***1.3.3 Variantes en la combinación de las hiladas***

Se han encontrado diversas combinaciones de hiladas de bloques y de tabiques en distintas regiones del país, algunas más comunes que otras, cada una de ellas dependiendo del gusto de los dueños de la construcción y del presupuesto con el que cuentan, ya que usar más hiladas de tabique, significa utilizar más mortero y más tabique de barro, que resulta mas costoso. En las figuras 1.15 a 1.17 se observan diversos arreglos de esta mampostería y los lugares donde se encuentran estas construcciones.





a) Cholula, Puebla  
Una hiladas de tabique por una de bloque



b) Cholula, Puebla  
Tres hiladas de tabique por dos de bloque



c) Estado de México  
Dos hiladas de tabique por dos de bloque

Figura 1.15. Diversidad en el arreglo de las hiladas.



d) Cahuacán, Estado de México  
Tres hiladas de tabique por dos de bloque



e) Cholula, Puebla  
Tres hiladas de tabique por tres de bloque



f) Estado de México  
Dos hiladas de tabique por una de bloque

Figura 1.16. Diversidad en el arreglo de las hiladas.



g) Oaxaca, Oaxaca

Tres hiladas de bloque por dos de tabique.

Figura 1.17. Diversidad en el arreglo de las hiladas.

## ***2 DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES ÍNDICE DE LOS MATERIALES UTILIZADOS***

### **2.1 PROPIEDADES DE LAS PIEZAS (BLOQUES Y LADRILLOS)**

Con la finalidad de obtener las propiedades de las piezas utilizadas en la elaboración de la mampostería combinada, se realizaron pruebas para determinar sus características como lo son: absorción inicial, absorción, coeficiente de saturación, peso volumétrico, resistencia a la compresión y módulo de ruptura de acuerdo a las normas correspondientes.

Las propiedades de las piezas, dependiendo del tipo y la calidad de los morteros, determinan la resistencia de la mampostería combinada y permiten hacer un diseño de la misma, conocer sus propiedades índice y predecir racionalmente su comportamiento.

Las piezas estudiadas fueron tabiques de barro recocido con dimensiones promedio de 5.5cm x 12cm x 24cm y bloques macizos de tepojal con dimensiones promedio de 12cm x 18.5cm x 38cm, como los mostrados en la figura 2.1. Las piezas analizadas fueron obtenidas en lugares de venta de materiales de construcción cerca del Estado de México, con características físicas similares a las piezas observadas en los estados donde el uso de la mampostería combinada es frecuente.



Figura 2.1. Piezas de mampostería utilizadas en la construcción de los muros, pilas y muretes

#### ***2.1.1 Absorción***

La absorción de los especímenes fue obtenida de acuerdo con la norma NMX-C-404-ONNCCE.

Para la determinación de la absorción, fue necesario colocar en un horno las piezas, tomando mediciones de sus pesos cada hora, considerando que al no variar el peso de una medición a otra la pieza está seca.

Una vez secas las piezas, se introdujeron durante 24 hrs. en un recipiente con agua a temperatura ambiente y al finalizar dicho tiempo, se les pesó nuevamente. (figura 2.2.).



a) Secado en horno



b) Inmersión en agua durante 24 hrs

Figura 2.2. Secado e inmersión de las piezas en agua durante 24 hrs.

La absorción de las piezas se determinó de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$absorcion = \frac{W_{24h} - W_s}{W_s} \quad (2.1)$$

$W_{24h}$  =Peso de agua absorbida después de 24 hrs. de inmersión en agua a temperatura ambiente.

$W_s$  = Peso seco.

En la tabla 2.1 se muestran los valores de las absorciones obtenidas en el laboratorio.

<b>Tabla 2.1. Absorción de las piezas después de sumergidas 24hrs en agua</b>	
<b>Pieza</b>	<b>Absorción %</b>
Tabique de barro recocido	18.84
Bloque sólido de concreto ligero	28.06

La norma limita a un intervalo de 13-21% para tabiques recocidos y entre 12 y 19% para tabiques extruidos.

### 2.1.2 Absorción inicial

Esta prueba sirve para determinar la capilaridad de las piezas y su capacidad de succión.

Para determinar estas propiedades, se sumergieron piezas secas en un recipiente con agua hasta 1/8" de su altura durante un minuto, se limpió el exceso de agua con un trapo húmedo y se tomaron sus pesos, figura 2.3.



Figura 2.3. Prueba da absorción inicial

La absorción inicial (IRA) para todas las piezas se calculó como:

$$IRA = (W_{lmin} - W_s) \frac{30in^2}{A_n} \leq 30 \frac{gramos}{min} \quad (2.2)$$

Esta prueba se realizó con base en la NMX-C-404-ONNCCE, que toma en cuenta el tamaño de la charola donde debe realizarse la prueba y el diámetro de los apoyos donde se colocaran de las piezas.

En la tabla 2.2 se muestran las absorciones iniciales obtenidas en el laboratorio para los tabiques y los bloques.

<b>Tabla 2.2. Absorción inicial</b>	
<b>Pieza</b>	<b>Absorción inicial gr/min</b>
Tabique de barro recocido	54.6
Bloque sólido de concreto ligero	82.88

En la tabla se observa que en ambas piezas se sobrepasa el límite de 30 gr/min.

Lo que implica que se reduzca la resistencia y la adherencia del mortero con las piezas, ya que el mortero tiende a secarse y agrietarse, se reduce la trabajabilidad y se esperaría un deslizamiento entre las piezas y el mortero debido a la mala adherencia.

### 2.1.3 Coeficiente de saturación

Este es un coeficiente que indica la cantidad de cavidades secundarias que tienen las piezas. Un coeficiente de saturación bajo indicaría que la pieza contiene muchas cavidades secundarias, lo que le permite acomodar de mejor manera deformaciones térmicas.

Para la obtención de este coeficiente, las piezas que estuvieron sumergidas en agua a temperatura ambiente durante 24 horas, es decir saturadas, se les sumergió en agua

hirviendo por un lapso de 5 horas, para provocar que el agua hirviendo (con menor densidad), llenará las cavidades secundarias (mas pequeñas), se limpió el exceso de agua con un trapo húmedo y se pesaron las probetas, figura 2.4.



Figura 2.4. Inmersión de las piezas en agua hirviendo por 5 hrs.

Este coeficiente fue calculado de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$CS = \frac{W_{24hrs} - W_s}{W_{5hrs} - W_s} \leq 1 \quad (2.3)$$

$W_{24hrs}$  = Peso de pieza después de 24hrs. de inmersión en agua a temperatura ambiente.

$W_{5hrs}$  = Peso de pieza después de 5hrs. de inmersión en agua hirviendo.

$W_s$  = Peso seco.

En la tabla 2.3 se muestran los coeficientes de saturación para las piezas probadas.

<b>Tabla 2.3. Coeficientes de saturación</b>	
<b>Pieza</b>	<b>CS</b>
Tabique de barro recocido	0.90
Bloque sólido de concreto ligero	0.89

#### **2.1.4 Resistencia a la compresión**

Para la obtención de la resistencia a compresión de las piezas se cabecearon con azufre cinco piezas de tabique rojo recocido y cinco bloques. Se les aplicó una carga perpendicular hasta llevarlos a la falla. La prueba se realizó en la máquina universal del Laboratorio de Estructuras de la Universidad Autónoma Metropolitana.

Esta prueba se llevó a cabo de acuerdo con la norma NMX-C-036, que establece la preparación de la probeta, las características de la máquina donde se debe realizar la prueba y las características generales del ensayo, como la colocación de las piezas y la velocidad de aplicación de la carga, figura 2.5.





a) Ensaye a compresión de bloque sólido



b) Ensaye a compresión de tabique

Figura 2.5. Ensaye a compresión de las piezas

La resistencia nominal de compresión de las piezas se obtuvo a partir de la siguiente ecuación (2.4):

$$f_p^* = \frac{\bar{f}_p}{1 + 2.5c_p} \quad (2.4)$$

donde:

$\bar{f}_p$  = media de la resistencia a compresión de las piezas, referida al área bruta.

$c_p$  = coeficiente de variación de la resistencia a compresión de las probetas, el cual no deberá ser menor de los valores mínimos establecido por las NTCM-2004, dependiendo del procedimiento de fabricación de las piezas y  $\bar{f}_p$  es el promedio de la resistencia a compresión de las piezas.

Las NTCM-2004 establecen:

$c_p \geq 0.2 \rightarrow$  Cuando el proceso de elaboración se efectúa a través de plantas mecanizadas que cuentan con un sistema de control de calidad.

$c_p \geq 0.3 \rightarrow$  Cuando el proceso de elaboración se efectúa a través de plantas mecanizadas que no cuentan con un sistema de control de calidad.

$c_p \geq 0.35 \rightarrow$  Cuando el proceso de elaboración es artesanal.

Se tomó un coeficiente de variación para los tabiques de 0.35 y para los bloques un coeficiente de 0.3.

En la tabla 2.4 se presentan las resistencias a la compresión de las piezas obtenidas en los ensayos del laboratorio.

**Tabla 2.4. Resistencia media y resistencia a compresión de las piezas**

Pieza	Resistencia media ( $\bar{f}_p$ )	Resistencia de diseño ( $f_p^*$ )
	kg/cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>
Tabique de barro recocido	93.4	49.8
Bloque sólido de concreto ligero	38.6	22.1



Las NTCM-2004 de mampostería hacen referencia a resistencias de compresión y compresión diagonal de la mampostería elaborada con tabiques de barro recocido con  $f_p^* \geq 60 \text{ kg/cm}^2$  y elaborada con tabiques de concreto (tabicón) con  $f_p^* \geq 100 \text{ kg/cm}^2$ , lo que indica que las piezas estudiadas no cumplen con las resistencias mínimas establecidas en las normas.

### 2.1.5 Módulo de ruptura

Esta prueba se realiza esta para medir la resistencia a la tensión de las piezas, consiste en cargar a los bloques y a los tabiques como vigas simplemente apoyadas con una carga concentrada al centro, como se muestra en la figura 2.6. Para la determinación de este índice de resistencia se ensayaron tres piezas de tabique rojo y tres piezas de bloque ligero.



a) Ensayo de bloque



b) Ensayo de tabique

Figura 2.6. Prueba para determinar el módulo de ruptura

Las piezas están simplemente apoyadas, el momento al centro será:

$$M = \frac{PL}{4} \quad (2.5)$$

por lo tanto, el módulo de ruptura se calculará de acuerdo a:

$$f_r = \frac{M}{S} = \frac{\frac{PL}{4}}{\frac{bt^2}{6}} = \frac{3PL}{2bt^2} \quad (2.6)$$

En la tabla 2.5 se presentan los resultados de los módulos de ruptura para los bloques y los tabiques probados en el laboratorio.

<b>Tabla 2.5. Valores medios de módulos de ruptura</b>	
<b>Pieza</b>	<b>Módulo de ruptura (kg/cm<sup>2</sup>)</b>
Tabique de barro recocido	9.97
Bloque sólido de concreto ligero	11.39

Para tabiques de barro recocidos la norma establece un valor mínimo:  $f_r \rightarrow 6 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$

### 2.1.6 Peso volumétrico

Para caracterizar completamente a las piezas, se determinó su peso volumétrico, obteniendo los valores promedio reportados en la tabla 2.6.

Tabla 2.6. Valores medios de pesos volumétricos	
Pieza	Peso volumétrico ton/m <sup>3</sup>
Tabique de barro recocido	1.55
Bloque sólido de concreto ligero	1.06

Para las piezas de tabique de barro recocido las NTCM-2004 establecen un valor mínimo de  $1.3 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}$  y para tabiques de concreto, tabicón  $1.5 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}$ .

Las piezas de concreto solidó ligero no cumplen con lo indicado con los pesos volumétricos mínimos de las NTCM-2004.

### 2.1.7 Fenómeno de la junta

El mortero y las piezas no tienen siempre la misma expansión lateral bajo la misma compresión, por lo tanto una de ellas quedará restringido en su expansión y aumentará su resistencia y el otro que lo restringe quedará sometido a esfuerzos de tensión que favorecen a su ruptura, este modo de falla es el fenómeno de la junta.

La falla del muro principalmente es causada por la falla de las piezas, no por la del mortero que las une, ya que la falla de este otro no provoca la inestabilidad ni el derrumbe, como se mencionó con anterioridad el mortero se expande más que las piezas reduce su resistencia al introducir en ellos esfuerzos de tensión.

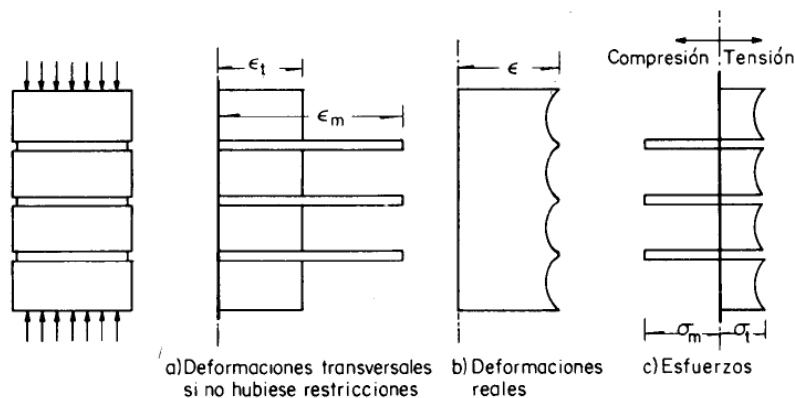


Figura 2.7. Idealización entre mortero piezas.

Cualitativamente se podría decir del modelo anterior que los esfuerzos transversales inducidos en los dos materiales serán mayores cuanto mayor sea la diferencia de módulos

de elasticidad respectivos y cuanto mayor sea el espesor de la junta, por lo tanto se esperaría un agrietamiento vertical en el miembro.

## 2.2 PROPIEDADES DEL MORTERO UTILIZADO EN AUTOCONSTRUCCIÓN

Los morteros están elaborados por arena, agua, cemento y en ocasiones se añade cal a la mezcla. Su uso principal es el de unir las piezas o la de brindarle un acabado a la construcción de mampostería. La cantidad de mortero va de aproximadamente el 7% al 12% del volumen total de un muro de mampostería (Schneider y Dickey 1987).

Las características que aporta cada uno de los componentes del mortero a la mezcla son los siguientes:

El cemento controla la resistencia y la durabilidad del mortero.

El agua ayuda a homogeneizar todo el material.

La cal aporta trabajabilidad y retentividad de agua, mejora la adherencia del mortero con las piezas.

La arena da volumen y es el cuerpo principal del mortero.

La selección de los agregados del mortero afecta directamente al comportamiento y a la adherencia de las piezas.

Podemos encontrar diferentes morteros de diversas resistencias de acuerdo a los proporcionamientos de agregados con los que están elaborados. La resistencia de estos morteros está relacionada principalmente con la relación agua-cemento que se utilice.

Hay algunas propiedades del mortero que influyen en el comportamiento de la mampostería, como lo son, el módulo de elasticidad, la resistencia a la compresión y la adherencia, ya que estas propiedades afectan a la deformabilidad y la resistencia a compresión de todo el conjunto. La adherencia influye en la resistencia a compresión diagonal de la mampostería evitando el deslizamiento de las piezas.

Las NTCM-2004 establecen una serie de requisitos que deben de cumplir los morteros que se empleen en elementos estructurales de mampostería.

Los requisitos son los siguientes:

Su resistencia a compresión será de por lo menos de  $40 \frac{kg}{cm^2}$ .

Se deberá de contener cemento Portland en la cantidad mínima indicada en la tabla 2.7.

La relación volumétrica entre la arena y la suma de cementantes se encontrara entre 2.25 y tres.

Se empleará una cantidad mínima de agua que de cómo resultado un mortero fácilmente trabajable.

Tipo de mortero	Partes de cemento hidráulico	Partes de cemento de albañilería	Partes de cal hidratada	Partes de arena <sup>1</sup>	Resistencia nominal en compresión, $f'_c$ , MPa (kg/cm <sup>2</sup> )
I	1	—	0 a 1/4	No menos de 2.25 ni más de 3 veces la suma de cementantes en volumen	12.5 (125)
	1	0 a 1/2	—		
II	1	—	1/4 a 1/2		7.5 (75)
	1	1/2 a 1	—		
III	1	—	1/2 a 1 1/4		4.0 (40)

<sup>1</sup> El volumen de arena se medirá en estado suelto.

Tabla 2.7. proporcionamientos, en volumen, recomendados por las NTCM-2004 para morteros en elementos estructurales

Para documentar este proyecto se realizó investigación de campo, tomando diversas fotografías de las combinaciones de mampostería mas frecuentes que se presentan en algunos estados de la Republica Mexicana y en ocasiones se les preguntó el proporcionamiento de materiales utilizado para elaborar el mortero a las personas que se encontraban trabajando en las construcciones.

Los proporcionamientos en las diferentes zonas encuestadas fueron muy similares, se caracterizaban por contener una elevada cantidad de cal y una cantidad moderada de cemento.

La proporción de materiales más comúnmente reportada fue la siguiente:

- 1 bulto de cemento
- 2 bultos de cal
- 12 botes de arena
- Agua necesaria para obtener un mortero trabajable

Por lo tanto, tomando en cuenta que 1 bulto = 2 botes, la proporción volumétrica cemento-cal-arena de este mortero es: 1:2:6, proporción que excede al límite de 1:1.25:6.75 para el mortero tipo III con mayor cantidad de cal permitido por las NTCM-2004. Sin embargo, es un mortero más denso, ya que la relación de volumen de arena entre volumen de cementantes (cemento y cal) es 2. Ciertamente es un mortero más denso que el mortero tipo O (1:2:9) y con mayor cal que el tipo N (1:1:6) que permiten los reglamentos UBC, IBC y ACI de los Estados Unidos (Tena 2004).

Evidentemente, la inclusión de cal en estas cantidades afecta algunas propiedades de la mezcla de mortero. Se ve afectada su resistencia a la compresión, disminuyéndola. La cal hace que la mezcla tenga mayor retentividad de agua, esto ocasiona que el mortero posea mayor trabajabilidad. La cal mejora la adherencia del mortero con las piezas. En este proporcionamiento, la mezcla es densa, por lo que se trata de un mortero poco poroso, por tanto, más impermeable y menos propenso a ser afectado por la intemperie.

Para conocer las resistencias de dichos morteros, con los cuales fueron construidos los muretes, las pilas, y los muros que se presentan en esta investigación, se tomaron muestras al momento de la construcción de los especímenes y fueron ensayados en el laboratorio para conocer sus resistencias, figura 2.8.

Las muestras consistieron en cubos de mortero de 5cm x 5cm x 5cm, curados bajo las mismas condiciones de los especímenes construidos.



a) Muestras de mortero



b) Ensayo de cubos de mortero

Figura 2.8. Resistencia a compresión de mortero

En la tabla 2.8 podremos encontrar las resistencias de diseño obtenidas mediante la ecuación 2.7.

$$f_j^* = \frac{\bar{f}_j}{1 + 2.5c_j} \quad (2.7)$$

donde:

$\bar{f}_j$  = Media de la resistencia a compresión de cubos de mortero.

$c_j$  = Coeficiente de variación de la resistencia a compresión del mortero, no se podrá tomar menor de 0.2.

Se tomó un coeficiente de variación de 0.2 para obtener la resistencia de diseño de mortero.

**Tabla 2.8. Resistencia media y resistencia de diseño de cubos de mortero**

Mortero	$c_j =$	Resistencia media ( $\bar{f}_j$ ) kg/cm <sup>2</sup>	Resistencia de diseño ( $f_j^*$ ) kg/cm <sup>2</sup>
Muro MCC-3, arreglo 1	0.038	66.99	44.66
Pilas, arreglo 1	0.033	107.3	71.48
Muretes, arreglo 1	0.161	37.59	25.06
Muro MCC-4, arreglo 2	0.157	99.75	66.49
Pilas, arreglo 2	0.157	99.75	66.49
Muretes, arreglo 2	0.152	77.66	51.77

### 2.3 PROPIEDADES ÍNDICE DEL ENSAYE DE PILAS ( $f_m^*$ , $E_m$ )

El propósito principal de la construcción de las pilas es la de conocer la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad de la mampostería combinada.

Se le denomina pila al arreglo de bloques y tabiques sobrepuestos, con un número mínimo de piezas de tres. Además, el número de hiladas debe ser el suficiente para que la relación altura- espesor se encuentre entre dos y cinco.

En esta investigación se ensayaron un total de 18 pilas, de las cuales nueve tenían un arreglo de piezas como el mostrado en la figura 2.9 y pertenecían al primer arreglo de bloques y tabiques elegido para llevar a cabo la primera parte de este estudio, y las nueve restantes tenían un arreglo como el mostrado en la misma figura y pertenecían al segundo arreglo seleccionado.

Las dimensiones promedio reales de los dos tipos de pilas fueron los mismos: 38cm x 56.5cm.

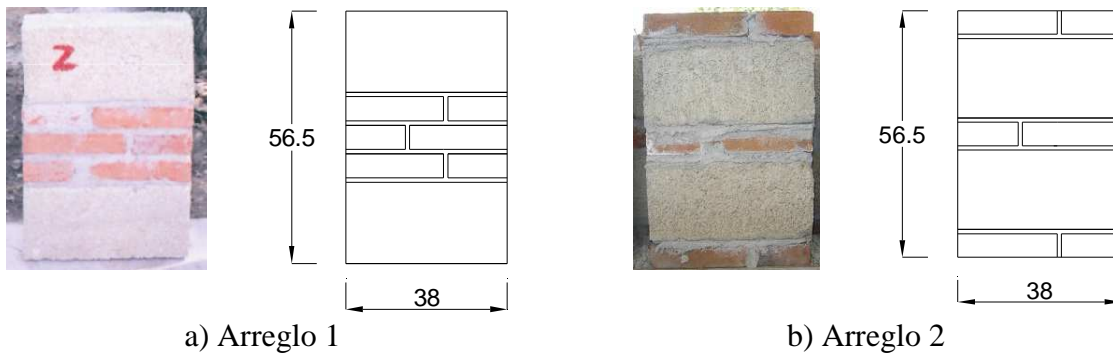


Figura 2.9. Arreglos de pilas estudiados en esta investigación

Para poder medir el acortamiento de las pilas a compresión a través de micrómetros electrónicos con precisión de 0.01mm, fue necesaria la construcción de un dispositivo para su sujeción a los lados de las pilas, el cual se muestra en la figura 2.10.



Figura 2.10. Dispositivo para sujetar micrómetros

Al momento de la prueba se colocó una celda de carga entre el cabezal de la máquina y las pilas, la cual junto con los micrómetros, fueron conectados a un sistema de adquisición de datos para capturar todas las mediciones en una computadora. La carga de compresión se aplicó perpendicular a las hiladas y se incrementó de manera constante hasta llevar las pilas a la falla. Se tomaron lecturas a cada 200 kg de carga. La velocidad de carga a la que se probaron las pilas fue la correspondiente a 1 mm/minuto.

Las pilas construidas se curaron a la intemperie y no fueron movidas sino hasta el momento de su preparación para la prueba.

La prueba se realizó en la máquina universal del Laboratorio de Estructuras de la Universidad Autónoma Metropolitana y con base en las Normas Técnicas Complementarias de Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (NTCM-2004).

Las fallas más comúnmente observadas fueron grietas verticales y aplastamiento en los bloques, tanto para el primer arreglo, figura 2.11, como para el segundo arreglo figura 2.12.



a) Agrietamiento vertical y aplastamiento del los bloques

b) Agrietamiento vertical de las pilas

Figura 2.11. Fallas mas comunes en el ensayo de pilas, Arreglo 1



a) Agrietamiento vertical y aplastamiento del los bloques

b) Agrietamiento vertical de las pilas

Figura 2.12. Fallas mas comunes en el ensayo de pilas, Arreglo 2

Los resultados de las pruebas realizadas en el laboratorio para las 18 pilas se resumen en la tabla 2.8.



La resistencia de diseño a compresión para ambos casos se determinó de acuerdo con lo establecido por las NTCM-2004.

$$f_m^* = \frac{\bar{f}_m}{1 + 2.5c_m} \quad (2.8)$$

$\bar{f}_m$  = media de la resistencia a compresión de las pilas.

$c_m$  = coeficiente de variación de la resistencia a compresión de las pilas de mampostería, en ningún caso se tomará menor a 0.15.

Se consideró un coeficiente de variación de 0.19 para el cálculo de la resistencia de diseño a compresión de la mampostería para ambos arreglos de acuerdo a los datos obtenidos de las pruebas de las pilas (apéndice A), también se hizo la corrección por esbeltez en el esfuerzo promedio obtenido del ensaye de las pilas para el cálculo de la resistencia de diseño como lo marcan las NTCM-2004.

**Tabla 2.8. Resistencia media a compresión y resistencia a compresión de diseño**

Pilas	Resistencia media ( $\bar{f}_m$ )	Resistencia de diseño ( $f_m^*$ )
	kg/cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>
Pilas, arreglo 1	23.23	16.13
Pilas, arreglo 2	23.23	16.06

El módulo de elasticidad de cada una de las pilas se determinó a partir de las curvas experimentales esfuerzo-deformación empleando las siguientes expresiones (ONNCCE 2006), figura 2.13.

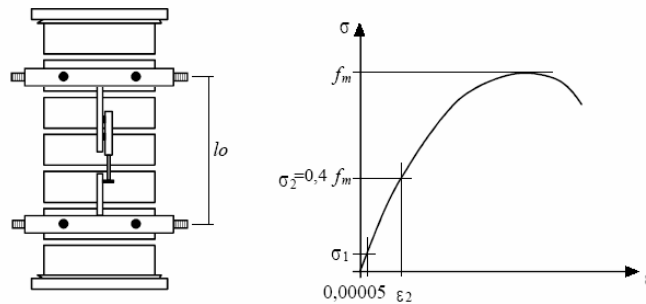


Figura 2.13. Determinación del módulo de elasticidad de la mampostería

$$E_m = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - 0.00005} ; \varepsilon = \frac{\delta}{l_0} \quad (2.9)$$

$E_m$  = Es el módulo de elasticidad de la mampostería

$\sigma_1$  = Es el esfuerzo de compresión de la mampostería equivalente a  $0.05\bar{f}_m$

$\sigma_2$  = Es el esfuerzo de compresión de la mampostería equivalente a  $0.4\bar{f}_m$

$\varepsilon_2$  = Es la deformación unitaria de la mampostería asociada a  $\sigma_2$ .



Los módulos de elasticidad promedio para los dos arreglos de pilas ensayados son los reportados en la tabla 2.9

<b>Tabla 2.9 Módulos de elasticidad promedio</b>	
<b>Pilas</b>	<b><math>E_m</math> kg/cm<sup>2</sup></b>
Pilas, arreglo 1	16359.6
Pilas, arreglo 2	14871.7

En las NTCM-2004 se establece un criterio para la obtención del módulo de elasticidad a partir de la resistencia de diseño a compresión de la mampostería para cargas de corta duración y para cargas permanentes, para mampostería elaborada con tabiques de barro recocido y bloques de concreto, aunque la modalidad de mampostería estudiada es la combinación de bloques y tabiques, se hace una comparación con los módulos obtenidos con los ensayos del laboratorio y con las ecuaciones del reglamento, tabla 2.10.

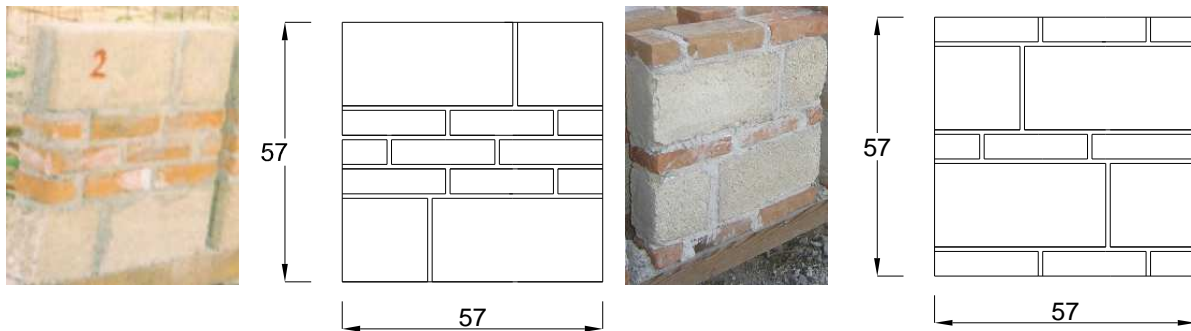
<b>Tabla 2.10 Módulos de elasticidad de acuerdo a las NTCM-2004</b>		
<b>Pilas</b>	<b>Cargas de corta duración (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Cargas sostenidas (kg/cm<sup>2</sup>)</b>
<b>Tabiques y bloques de concreto</b>	<b><math>E_m=800 f_m^*</math></b>	<b><math>E_m=350 f_m^*</math></b>
Pilas, arreglo 1	12904	5645.5
Pilas, arreglo 2	12848	5621
<b>Tabiques de barro y otras piezas</b>	<b><math>E_m=600 f_m^*</math></b>	<b><math>E_m=350 f_m^*</math></b>
Pilas, arreglo 1	9678	5645.5
Pilas, arreglo 2	9636	5621

## 2.4 PROPIEDADES INDICE DEL ENSAYE DE MURETES ( $v_m^*, G_m$ )

Para poder determinar la resistencia a la compresión diagonal de la mampostería y el módulo de rigidez a corte es necesaria la construcción y el ensaye de muretes, de acuerdo a las NTCM-2004.

Los muretes son probetas con longitud de al menos una vez y media la máxima dimensión de la pieza. Las hiladas deben ser suficientes para que la altura sea aproximadamente igual a su base. El arreglo de las piezas deberá de ser igual al arreglo utilizado en la obra.

Se elaboraron y ensayaron un total de 18 muretes, nueve de ellos correspondían al arreglo del primer muro descrito en esta tesis y las nueve restantes correspondían al arreglo del segundo muro probado, figura 2.14.



a) Arreglo 1  
b) Arreglo 2  
Figura 2.14. Arreglos de muretes estudiados en esta investigación

Para poder obtener información de las deformaciones a lo largo de las diagonales de los muretes fue necesaria la construcción de un dispositivo que se sujetara al murete y al mismo tiempo sujetara los micrómetros electrónicos. Figura 2.15.



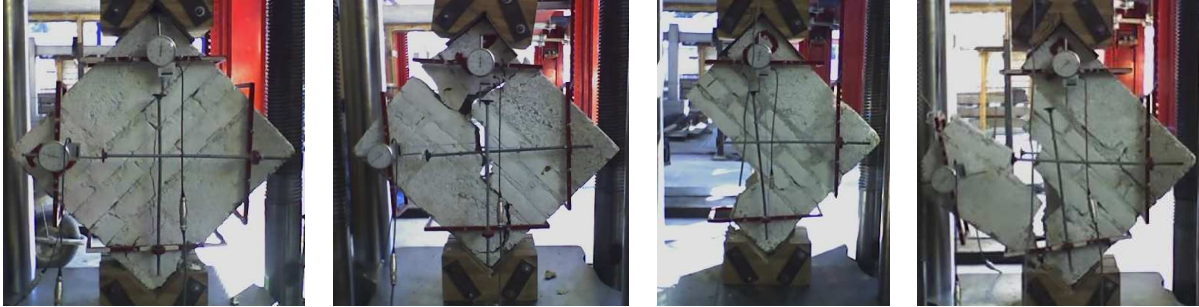
Figura 2.15. Dispositivo para la sujeción de micrómetros en el ensaye de muretes

En cada ensayo se colocaron cuatro micrómetros y una celda de carga, dicha celda entre el murete y el cabezal de la máquina. Estos instrumentos fueron conectados a un sistema de adquisición de datos para transmitir todas las mediciones realizadas a una computadora. Se tomaron mediciones a cada 200kg hasta llevarlos a la falla. La velocidad de carga fue de 1mm/minuto.

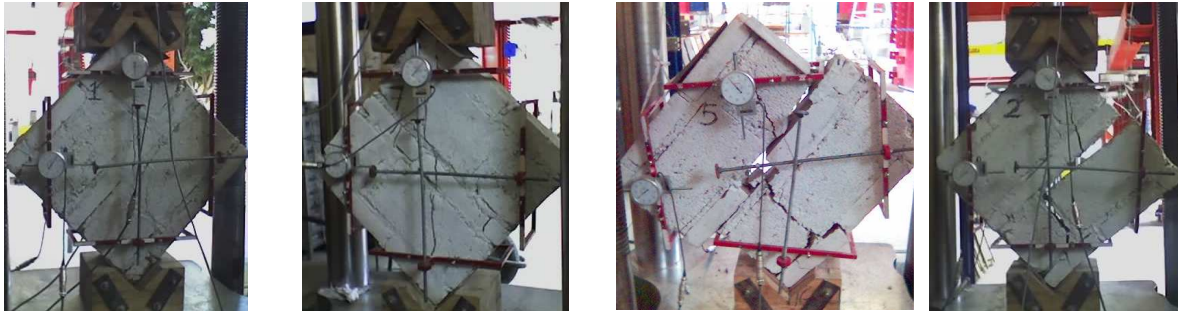
Las dimensiones promedio de los dos grupos de muretes ensayadas fueron las mismas: 57cm x 57cm. Las probetas se curaron a la intemperie y no se movieron del lugar de su fabricación sino hasta el día de su prueba.

Se utilizaron cabezales de madera en las esquinas de los muretes para una distribución más uniforme de esfuerzos.

La carga aplicada a lo largo de la diagonal de los muretes crea esfuerzos de tensión en la mampostería en dirección perpendicular a dicha carga, de tal manera que el modo principal de falla observado para ambos arreglos fue el de una grieta vertical a lo largo de la diagonal cargada, sin embargo también se observaron fallas por deslizamiento de las piezas, debido a la poca adherencia figura 2.16 y 2.17.



a) Agrietamiento debido a la tensión diagonal b) Falla por deslizamiento de las piezas  
Figura 2.16. Fallas mas comunes en el ensayo de muretes, arreglo 1



a) Agrietamiento debido a la tensión diagonal b) Falla por deslizamiento de las piezas  
Figura 2.17. Fallas mas comunes en el ensayo de muretes, arreglo 2

Los ensayos de las pilas se realizaron en la máquina universal del Laboratorio de Estructuras de la Universidad Autónoma Metropolitana y con base en las NTCM-2004.

Los resultados de las pruebas realizadas en el laboratorio para los 18 muretes se reportan en la tabla 2.11.

La resistencia de diseño a compresión diagonal se determinó de acuerdo con lo establecido en las NTCM-2004:

$$v_m^* = \frac{\bar{v}}{1 + 2.5c_v} \quad (2.10)$$

$\bar{v}_m$  = media de los esfuerzos resistentes de los muretes ensayados

$c_v$  = coeficiente de variación de los esfuerzos resistentes de los muretes, en ningún caso se tomará menor a 0.20.

Para el caso del primer arreglo, se tomó un coeficiente de variación de 0.29 y en el segundo arreglo de 0.43 (Apéndice A).

**Tabla 2.11. Resistencia media y resistencia de diseño a compresión diagonal.**

Muretes	Resistencia media ( $\bar{v}$ ) kg/cm <sup>2</sup>	Resistencia de diseño ( $v_m^*$ ) kg/cm <sup>2</sup>
Muretes, arreglo 1	2.81	1.63
Muretes, arreglo 2	2.53	1.21

El módulo de rigidez a cortante se obtuvo de acuerdo a la siguiente ecuación y a la figura 2.18, (ONNCCE 2006).

$$G_m = \frac{\tau_2 - \tau_1}{\gamma_2 - 0.00005} \quad (2.11)$$

$G_m$  = Rigidez secante a cortante;

$\tau_1$  = Esfuerzo cortante correspondiente a 0.00005 de deformación angular;

$\tau_2$  = Esfuerzo correspondiente a 40% de la carga máxima;

$\gamma_2$  = Deformación angular producida por el esfuerzo  $\tau_2$

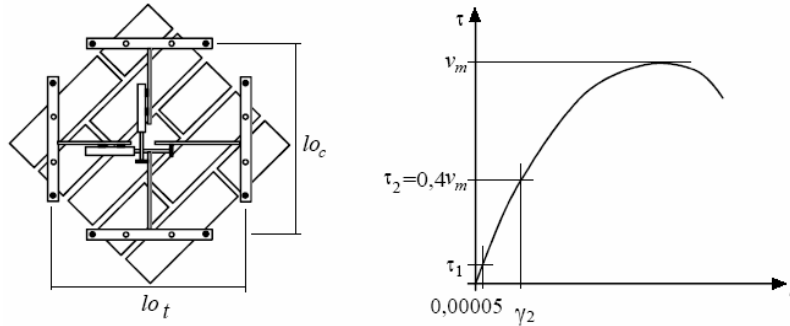


Figura 2.18. Obtención de la rigidez a cortante

Donde la deformación angular  $\tau$  se calcula como:

$$\gamma = |\epsilon_c| + |\epsilon_t| \quad (2.12)$$

$$\epsilon_c = \frac{\delta_c}{lo_c} ; \epsilon_t = \frac{\delta_t}{lo_t} \quad (2.13)$$

donde:

$\epsilon_c$  = Deformación de la diagonal a compresión;

$\epsilon_t$  = Deformación de la diagonal a tensión;

$\delta_c$  = Acortamiento medido sobre la longitud calibrada de la diagonal a compresión;

$\delta_t$  = Acortamiento medido sobre la longitud calibrada de la diagonal a tensión;

$lo_c$  = Longitud calibrada de la diagonal a compresión entre transductores, medida antes de la prueba;

$l_{o_i}$  = Longitud calibrada de la diagonal a tensión entre transductores, medida antes de la prueba.

En la tabla 2.12 se muestran los módulos de rigidez a cortante para ambos arreglos de muretes.

**Tabla 2.12. Módulos de rigidez a corte promedio**

Pilas	G kg/cm <sup>2</sup>
Muretes, arreglo 1	4256.4
Muretes, arreglo 2	3200.1

De acuerdo con las NTCM-2004 se puede calcular el módulo de cortante de la mampostería de acuerdo con el valor del módulo de elasticidad  $G_m=0.4E_m$ . De esta manera se muestran en la tabla 2.13 los valores de los módulos de corte para los valores de los diferentes módulos de elasticidad de acuerdo con la velocidad de aplicación de la carga.

**Tabla 2.13 Módulos de cortante de acuerdo a las NTCM-2004**

Pilas	Cargas de corta duración (kg/cm <sup>2</sup> )	Cargas sostenidas (kg/cm <sup>2</sup> )
<b>Tabiques y bloques de concreto</b>	<b><math>G_m=0.4 E_m</math></b>	<b><math>G_m=0.4 E_m</math></b>
Pilas, arreglo 1	5161.6	2258.2
Pilas, arreglo 2	5139.2	2248.4
<b>Tabiques de barro y otras piezas</b>	<b><math>G_m=0.4 E_m</math></b>	<b><math>G_m=0.4 E_m</math></b>
Pilas, arreglo 1	3871.2	2258.2
Pilas, arreglo 2	3854.4	2248.4

## 2.5 ENERGIA DE DEFORMACIÓN

La energía de deformación es el aumento de energía interna acumulado en el interior de un sólido deformable como resultado del trabajo realizado por las fuerzas que provocan la deformación.

Si se formula la energía de deformación unitaria por unidad de volumen del material, se le considera densidad de energía de deformación unitaria (Hibbeler 1998).

$$u = \frac{1}{2} \sigma \epsilon \quad (2.14)$$

Si el comportamiento del material es elástico lineal, es aplicable la ley de Hooke,  $\sigma = E \epsilon$ , y se puede expresar la densidad de energía en términos del esfuerzo uniaxial.

$$u = \frac{1}{2} \frac{\sigma^2}{E} \quad (2.15)$$

Cuando el esfuerzo alcanza el límite de proporcionalidad, la energía de deformación unitaria se llama módulo de resiliencia, que es el área debajo de la curva en el intervalo elástico, figura 2.19.

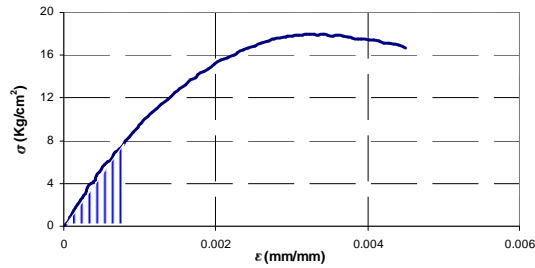


Figura 2.19. Concepto de módulo de resiliencia

$$u_r = \frac{1}{2} \frac{\sigma_{lp}^2}{E} \quad (2.16)$$

La resiliencia de un material representa físicamente la capacidad del mismo de absorber energía sin ningún daño permanente en el material. (Hibbeler 1998).

En la tabla 2.14 se muestran los valores de las resiliencias obtenidas de ambos arreglos de pilas y de muretes.

<b>Tabla 2.14. Módulo de resiliencias</b>	
<b>Pilas</b>	<b>U<sub>r</sub> Kg-cm/cm<sup>3</sup></b>
Pilas, arreglo 1	0.0063
Pilas, arreglo 2	0.011
Muretes, arreglo 1	0.000183
Muretes, arreglo 2	0.000353

Otra característica importante es el módulo de tenacidad, el cual indica la densidad de energía de deformación unitaria del material precisamente antes de que se rompa. Esta cantidad representa al área total dentro del diagrama esfuerzo deformación. Figura 2.20.

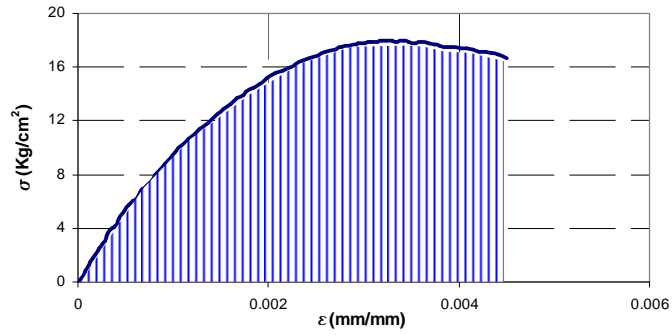


Figura 2.20. Concepto de módulo de tenacidad

Los materiales con módulo de tenacidad altos se deformarán inelásticamente mucho más que uno con un valor bajo y serán preferibles, ya que su falla no será súbita.

En la tabla 2.15 se muestran los valores obtenidos del módulo de tenacidad, para ambos arreglos de pilas y de muretes.

<b>Tabla 2.15. Módulo de tenacidad</b>	
<b>Pilas</b>	<b><math>U_t</math> <math>\text{Kg-cm/cm}^3</math></b>
Pilas, arreglo 1	0.048
Pilas, arreglo 2	0.128
Muretes, arreglo 1	0.0044
Muretes, arreglo 2	0.0097

### 3 RESUMEN DEL ENSAYE DE MUROS DE MAMPOSTERÍA COMBINADA Y CONFINADA UNIDOS CON MORTERO TIPO I

En este capítulo se presenta un resumen escueto del estudio realizado en la Universidad Autónoma Metropolitana (Juárez 2007, Tena *et al.* 2007), donde se describe el comportamiento general de la mampostería combinada y confinada unida con mortero tipo I.

La finalidad del estudio fue conocer el comportamiento de esta mampostería dadas las características del mejor mortero recomendado por las NTCM-2004 (tipo I) y, con ello, valorar la posible inclusión de esta modalidad de mampostería en futuras versiones de las NTCM-2004.

En este estudio se construyeron dos muros de mampostería combinados y confinados como se muestra en la figura 3.2. Además, se construyeron 18 pilas y 18 muretes, para obtener las resistencias a la compresión y al cortante. Se tomaron muestras del concreto utilizado en los castillos y el mortero empleado en la elaboración de los muros y muretes, además se realizaron pruebas a las piezas utilizadas en la construcción de las probetas para determinar sus propiedades.

#### 3.1 PROPIEDADES DE LAS PIEZAS

Para determinar las propiedades de las piezas con las cuales se construyeron las probetas fue necesario realizarles pruebas, a continuación se presenta un resumen de los resultados obtenidos en el laboratorio.

**Tabla 3.1. Absorción de las piezas después de sumergidas 24hrs en agua**

Pieza	Absorción %
Tabique de barro recocido	17.8
Bloque sólido de concreto ligero	25.2

**Tabla 3.2. Absorción inicial**

Pieza	Absorción inicial gr/min
Tabique de barro recocido	64.2
Bloque sólido de concreto ligero	32.7

**Tabla 3.3. Coeficientes de saturación**

Pieza	CS
Tabique de barro recocido	0.98
Bloque sólido de concreto ligero	0.98



**Tabla 3.4. Valores medios de módulos de ruptura**

Pieza	Módulo de ruptura (kg/cm <sup>2</sup> )
Tabique de barro recocido	7.7
Bloque sólido de concreto ligero	8.1

**Tabla 3.5. Valores medios de pesos volumétricos**

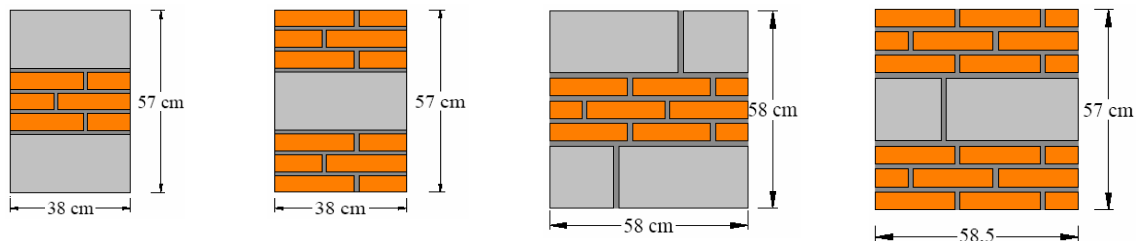
Pieza	Peso volumétrico ton/m <sup>3</sup>
Tabique de barro recocido	1.58
Bloque sólido de concreto ligero	1.09

**Tabla 3.6. Resistencia media y resistencia a compresión de las piezas**

Pieza	Resistencia media ( $\bar{f}_p$ ) kg/cm <sup>2</sup>	Resistencia de diseño ( $f_p^*$ ) kg/cm <sup>2</sup>
Tabique de barro recocido	113.8	61
Bloque sólido de concreto ligero	47.9	27.3

### 3.2 ENSAYE DE PILAS Y MURETES

Para la caracterización de la mampostería combinada fue necesario construir pilas y muretes unidos con mortero tipo I con la combinación de piezas mostrada en la figura 3.1.



a) Combinaciones de pilas ensayadas

b) Combinaciones de muretes ensayados

Figura 3.1. Pilas y muretes unidos con mortero Tipo I

Las pilas se sometieron a una carga de compresión axial y los muretes a una carga de compresión a lo largo de una de sus diagonales; las cargas fueron aplicadas por medio de la máquina universal de la UAM. Las resistencias promedio, así como las resistencias de diseño de las pilas y de los muretes se muestran en las tablas 3.7 y 3.8.

**Tabla 3.7. Resistencia a compresión de pilas.**

Pilas	( $\bar{f}_m$ ) kg/cm <sup>2</sup>	C <sub>m</sub>	( $f_m^*$ ) kg/cm <sup>2</sup>
Arreglo 1	32	0.15	23.3
Arreglo 2	26.25	0.17	18.5

**Tabla 3.8. Resistencia a corte de muretes.**

Muretes	$(\bar{v}_m)$ kg/cm <sup>2</sup>	C <sub>v</sub>	$(v_m^*)$ kg/cm <sup>2</sup>
Arreglo 1	2.9	0.51	1.28
Arreglo 2	3.86	0.18	2.57

Los módulos de elasticidad y el modulo a cortante producto de los ensayos de pilas y muretes se observan en la tabla 3.9 y 3.10.

**Tabla 3.9 Módulos de elasticidad promedio**

Pilas	E <sub>m</sub> kg/cm <sup>2</sup>
Pilas, arreglo 1	12714.0
Pilas, arreglo 2	11944.3

**Tabla 3.10. Módulos de rigidez a corte promedio**

Pilas	G kg/cm <sup>2</sup>
Muretes, arreglo 1	4283.8
Muretes, arreglo 2	3006.7

Se usó también un mortero tipo I en la construcción de los muros con la finalidad de poder hacer comparaciones con diversas investigaciones desarrolladas en el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), ya que han usado el mortero de mayor resistencia que marcan las NTCM-2004(mortero tipo I) para construir diversos muros de mampostería.

Los resultados del ensaye de las muestras de mortero empleado en la elaboración de los especímenes se presentan en la tabla 3.11.

**Tabla 3.11. Resultados del ensaye de mortero tipo I.**

Mortero	$(f_j^*)$ kg/cm <sup>2</sup> Mortero tipo I Según NTCM-2004	Coficiente de variación (cálculos) c <sub>j</sub>	Coficiente de variación (experimental) c <sub>j</sub>	$(f_j^*)$ kg/cm <sup>2</sup> Cubos de mortero ensayados
Pilas, arreglo 1	125	0.2	0.09	140.7
Pilas, arreglo 2	125	0.2	0.04	201.0
Muretes, arreglo 1	125	0.2	0.09	167.2
Muretes, arreglo 2	125	0.2	0.12	50.1
Muro MCC-1	125	0.2	0.03	205.7
Muro MCC-2	125	0.2	0.11	202.0

### 3.3 DESCRIPCIÓN DE LOS MUROS

Los muros ensayados con mortero Tipo I fueron nombrados MCC-1 y MCC-2 respectivamente, los muros tenían una combinación de tres hiladas de tabique por una de bloque. La diferencia principal entre ambos muros fue en el inicio de su construcción con la colocación de los tabiques o los bloques y en el cuatrapeo de los bloques.

En la figura 3.2 se muestra el arreglo de las piezas utilizado en la construcción de los muros.

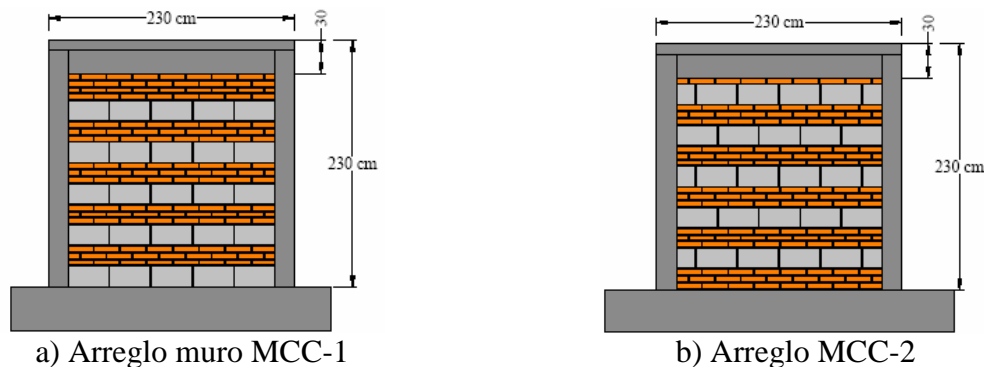


Figura 3.2. Combinaciones de hiladas de muros unidos con mortero tipo I

### 3.4 MODOS DE FALLA

Los muros estuvieron sujetos a una carga vertical de 2200 kg que se mantuvo constante en toda la prueba. Además, se les aplicó una carga cíclica horizontal a la altura de la losa.

La primera parte de la prueba estuvo controlada por carga hasta llegar a la carga de agrietamiento y la segunda parte del ensayo se controló por distorsiones, hasta llevarlos a un nivel de daño severo. En las figuras 3.3 y 3.4 se muestran los modos de falla para los muros ensayados.

#### 3.4.1 Muro MCC-1

Este muro alcanzó su carga de agrietamiento a 5.6 ton, a partir de este momento la prueba se controló por distorsiones. En el segundo ciclo de la distorsión de 0.6% presentó un deslizamiento importante en su altura media, extendiéndose la grieta de forma diagonal hasta llegar a la penetración de los castillos, esto condujo a la falla del muro.

El tamaño máximo de la grieta registrada fue de 22 mm tanto en bloque como en el tabique.



Figura 3.3. Modo de falla del muro MCC-1

### 3.4.2 Muro MCC-2

En su etapa elástica el muro llegó una distorsión de 0.07% y una carga de 5 ton; en este momento se formó la primera grieta teniendo un tamaño de 1.5 mm en el bloque y 2.5 mm en el tabique.

Al llegar a la carga máxima, se presentó un ancho de grietas en el tabique y el bloque de 15 mm y 10 mm respectivamente.

Este muro también presentó grietas diagonales que llegaron a penetrar los castillos, ésto ocasionó la inestabilidad del muro.



Figura 3.4. Modo de falla del muro MCC-2

En los primeros niveles de carga ambos muros presentaron pequeñas grietas a flexión en los castillos; sin embargo, su comportamiento estuvo dominado por corte.

### 3.5 COMPORTAMIENTO HISTERÉTICO

Las curvas de histéresis de los muros ensayados se presentan en la figura 3.5.

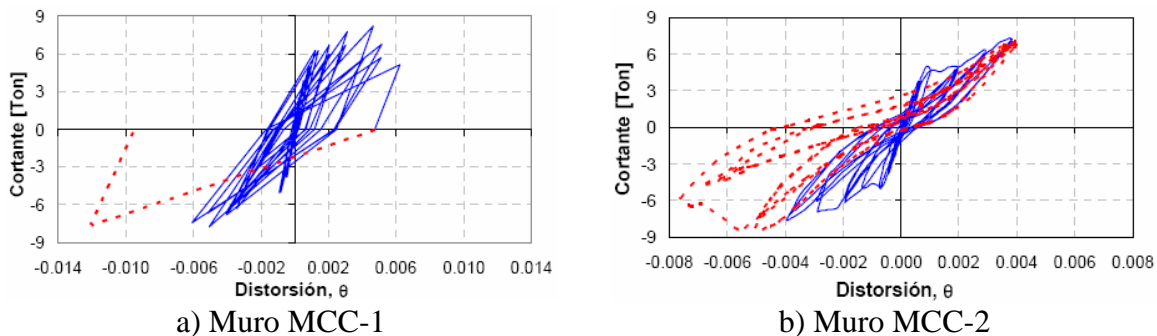


Figura 3.5 Curvas de histéresis muros de mampostería combinada unidos con mortero tipo I

En el ensaye del primer muro no se colocó celda de carga, por lo que no se contó con suficientes datos para realizar un trazo más detallado de los lazos de histéresis. En líneas punteadas se representa el último ciclo al que se llevó al muro y por la inestabilidad que presentaba no se completó el ciclo.

La curva de histéresis del segundo muro muestra en líneas punteadas una asimetría para las distorsiones mayores a 0.4% debido a que el dispositivo de aplicación de la carga mostró ciertos problemas al jalar el muro.

### 3.6 RESISTENCIA

De las curvas de histéresis se observan las resistencias a corte máximas que presentaron los muros y las distorsiones a dichas cargas.

Para el muro MCC-1 las cargas máximas correspondientes al empuje y al jale del espécimen fueron de 7.7 ton ( $\theta=0.0038$ ) y 8.4 ton ( $\theta=0.0056$ ) respectivamente.

Las cargas máximas para el segundo muro tanto para el empuje y el jale fueron de 7.3 ton ( $\theta=0.0038$ ) y 8.4 ton ( $\theta=0.0056$ ) respectivamente.

### 3.7 DEGRADACIÓN DE RIGIDEZ

La degradación de rigidez depende del daño que un evento sísmico imponga a una estructura. Un daño severo en una estructura mostraría una gran pérdida de rigidez.

En los reglamentos se acotan las distorsiones admisibles para evitar el agrietamiento excesivo y, por lo tanto, la pérdida de rigidez de los muros de mampostería. Esto sirve para prevenir su inestabilidad y evitar el colapso de las estructuras de mampostería.

En la figura 3.6 se muestra la degradación de rigidez con base en la distorsión obtenida para los dos muros ensayados. Con líneas punteadas se muestran los cambios en las rigideces para los segundos ciclos de carga.

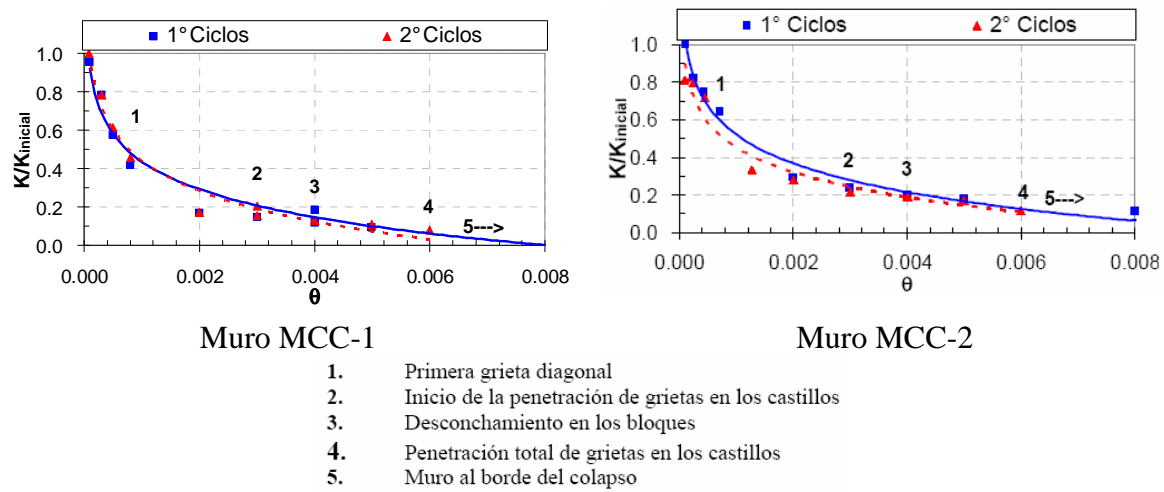


Figura 3.6 Degradación de rigidez

En las gráficas anteriores se observa que para distorsiones del orden del 0.05% los muros tienen una rigidez del 80% de la inicial. Al aparecer la primera grieta diagonal, la degradación de rigidez comienza a ser más notoria. Conforme las piezas se desconchan y las grietas diagonales penetran en los castillos, la pérdida de rigidez es mucho mayor, hasta que prácticamente los muros llegan a tener menos del 10% de su rigidez inicial.

### 3.8 DISIPACIÓN DE ENERGÍA

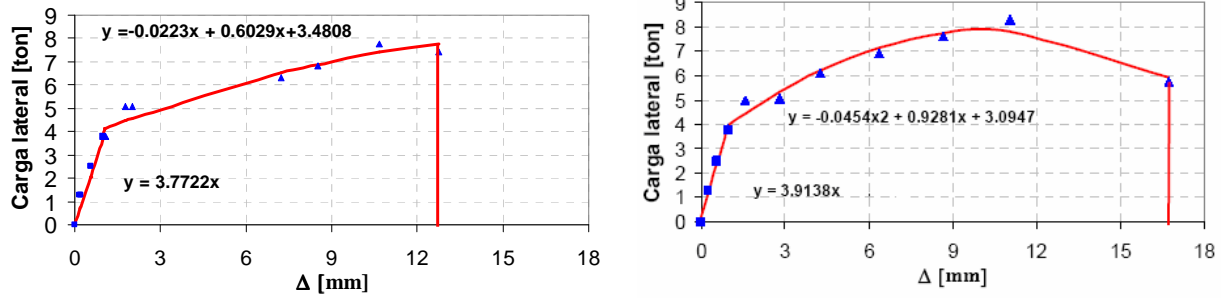
La capacidad que tiene un muro de mampostería para tomar las cargas impuestas producto de un evento sísmico a través de su deformación elástica o inelástica se define como capacidad de disipar energía.

#### 3.8.1 Energía de deformación

A través de la energía de deformación se puede conocer la energía disipada por la deformación elástica de los muros o la energía disipada producto de la incursión de los especímenes en su rango inelástico de comportamiento, el cual está asociado al daño en los elementos.

##### *Energía de deformación elástica*

La energía de deformación elástica fue obtenida mediante la integración del área bajo la curva en la parte elástica de la envolvente del cuadrante negativo del ciclo de histéresis. En la figura 3.7 se muestran las envolventes de los ciclos de histéresis y su correspondiente energía de deformación elástica (Juárez 2007).



a) Energía elástica modelo MCC-1

b) Energía elástica modelo MCC-2

Figura 3.7. Curvas ajustadas en el intervalo elástico de los modelos

Integrando la parte elástica para ambos muros se obtuvo la energía de deformación elástica

$$U_r = \int_0^{0.96} 3.7722x dx \quad \text{Energía elástica muro MCC-1} \quad U_r = 2 \text{ ton} \cdot \text{mm}$$

$$U_r = \int_0^{0.96} 3.9138x dx \quad \text{Energía elástica muro MCC-2} \quad U_r = 2.01 \text{ ton} \cdot \text{mm}$$

*Energía de deformación de fractura*

Esta energía fue obtenida a través de la integración de toda el área bajo la curva.

$$U_r = \int_0^{0.96} 3.7722x dx + \int_{0.96}^{12.76} -0.0223x^2 + 0.6029x + 3.48084 dx$$

$$\text{Energía elástica muro MCC-1:} \quad U_r = 75.26 \text{ ton} \cdot \text{mm}$$

$$U_r = \int_0^{0.96} 3.9138x dx + \int_{0.96}^{16.72} -0.0454x^2 + 0.9281x + 3.0947 dx$$

$$\text{Energía elástica muro MCC-2} \quad U_r = 109.4 \text{ ton} \cdot \text{mm}$$

## ***4 PREDICCIÓN SIMPLIFICADA DE LA CAPACIDAD RESISTENTE Y DEL MODO DE FALLA ESPERADO.***

En el diseño de estructuras se debe evaluar qué acciones rigen su diseño. En algunos lugares resulta evidente que las fuerzas más grandes que se presentan son producto de sismos. Las fuerzas producto de eventos sísmicos provocan demandas en las estructuras que a su vez generan esfuerzos superiores a las resistencias de sus materiales, ocasionando daños estructurales producto del agrietamiento que pueden ocasionar el colapso de la estructura.

En los muros de mampostería confinada ante carga lateral, su falla estructural generalmente se produce por cortante y, en ocasiones, por flexocompresión o flexotensión. Es por ello que debe siempre valorarse cuál de ellos limita su capacidad ante carga lateral.

### **4.1 ESTIMACIÓN DE LAS CARGAS DE AGRIETAMIENTO POR UN MECANISMO DE CORTANTE**

Los muros de mampostería deben de revisarse para que posean la suficiente resistencia a compresión, para que posean suficiente resistencia a corte y también se revisa la flexocompresión en su plano y, en caso de ser necesario, la flexocompresión fuera de su plano.

La resistencia a corte de los muros de mampostería depende en gran medida de la calidad de las piezas con las que se elabora. Existen piezas de cerámica con una elevada resistencia; sin embargo, son piezas muy frágiles. Las piezas utilizadas para la elaboración de estos muros (sobretudo los bloques) tuvieron una resistencia muy baja a compresión, con lo cual se espera una resistencia baja para los muros.

Otro parámetro que influye en la resistencia a corte de los muros es la carga axial que soportan, ya que esta carga tiende a confinar la mampostería y entre más grande sea más ayuda a la resistencia a corte.

En este estudio se presenta la resistencia estimada a corte para los muros ensayados con base en las resistencias a compresión diagonal de diseño obtenidas de los ensayos de muretes para los dos arreglos elegidos.

#### ***4.1.1 Muro MCC-3***

Considerando la carga vertical colocada sobre ellos de  $P = 2,200 \text{ kg}$ , el área del muro  $A_T = 2,760 \text{ cm}^2$ , y factores de reducción de resistencia unitarios para estimar resistencias nominales, se tendría que la carga de agrietamiento nominal asociada a la resistencia de diseño a compresión diagonal de la mampostería combinada  $v_m^* = 1.63 \text{ kg/cm}^2$  será:

$$\begin{aligned} V_{mR} &= F_R (0.5v_m^* A_T + 0.3P) \leq 1.5F_R v_m^* A_T \\ V_{mR} &= V_{mRn} = 2,910 \text{ kg} \end{aligned} \quad (4.1)$$



Si se considera la resistencia promedio  $v_m^* = \bar{v}_m = 2.81 \text{ kg/cm}^2$ , entonces:

$$V_{mR} = V_{mRn} = 4,537 \text{ kg}$$

#### **4.1.2 Muro MCC-4**

Considerando la carga vertical colocada sobre el muro de  $P = 2,200 \text{ kg}$ , el área del muro  $A_T = 2,760 \text{ cm}^2$ , y factores de reducción de resistencia unitarios  $F_R = 1$ , se tendría que la carga de agrietamiento nominal asociada a la resistencia a la compresión diagonal de la mampostería combinada  $v_m^* = 1.21 \text{ kg/cm}^2$  será:

$$V_{mR} = F_R (0.5v_m^* A_T + 0.3P) \leq 1.5F_R v_m^* A_T$$

$$V_{mR} = V_{mRn} = 2,330 \text{ kg}$$

Si se considera la resistencia promedio  $v_m^* = \bar{v}_m = 2.53 \text{ kg/cm}^2$ , entonces:

$$V_{mR} = V_{mRn} = 4,151 \text{ kg}$$

## **4.2 ESTIMACIÓN DE LA CARGA ÚLTIMA POR FLEXOCOMPRESIÓN**

Considerando la posibilidad de falla a flexión en el plano del muro se estimó la resistencia a flexión de acuerdo a las recomendaciones del NTCM-2004.

Las hipótesis para la obtención de las resistencias de diseño a flexotensión y flexocompresión de las estructuras de mampostería, de acuerdo a las NTCM-2004, es a partir del método general el cual se basa en el trazado de un diagrama de interacción P-M, con base en las hipótesis siguientes:

- La mampostería se comporta como un material homogéneo.
- La distribución de deformaciones unitarias longitudinales, en la sección transversal de un elemento es plana.
- Los esfuerzos de tensión son resistidos por el acero de refuerzo únicamente.
- Existe adherencia perfecta entre el acero de refuerzo vertical y el concreto o mortero de relleno que lo rodea.
- La sección falla cuando se alcanza, en la mampostería, la deformación unitaria máxima a compresión que se tomará igual a 0.003.
- A menos que ensayos en pilas permitan tener una mejor determinación de la curva esfuerzo deformación de la mampostería, esta se supondrá lineal hasta la falla.

Las NTCM-2004 establecen un método opcional en el apartado 5.3.2.2, el cual indica que, para muros confinados con castillos únicamente en los extremos, se puede calcular un diagrama de interacción (figura 4.1) aproximado mediante las ecuaciones siguientes:

$$M_R = F_R A_s f_y d' + 0.3 P_u d; \quad \text{si } P_u \leq \frac{P_R}{3} \quad (4.2)$$

$$M_R = (1.5 F_R A_s f_y d' + 0.15 P_R d) \left[ 1 - \frac{P_u}{P_R} \right]; \quad \text{si } P_u \geq \frac{P_R}{3} \quad (4.3)$$

En las expresiones anteriores:

- $F_R$  = igual a 0.8 si se emplea la primera ecuación ó 0.6 en caso contrario  
 $A_s$  = área de acero longitudinal colocado en el extremo del muro  
 $f_y$  = esfuerzo de fluencia especificado del acero de refuerzo  
 $d'$  = distancia entre los centroides del acero colocado en ambos extremos del muro  
 $P_u$  = carga axial de diseño total sobre el muro  
 $d$  = peralte efectivo del refuerzo de tensión  
 $P_R$  = resistencia a compresión axial definida en el inciso 5.3.1 de las NTCM-2004, que se calcula conforme a la ecuación 4.4

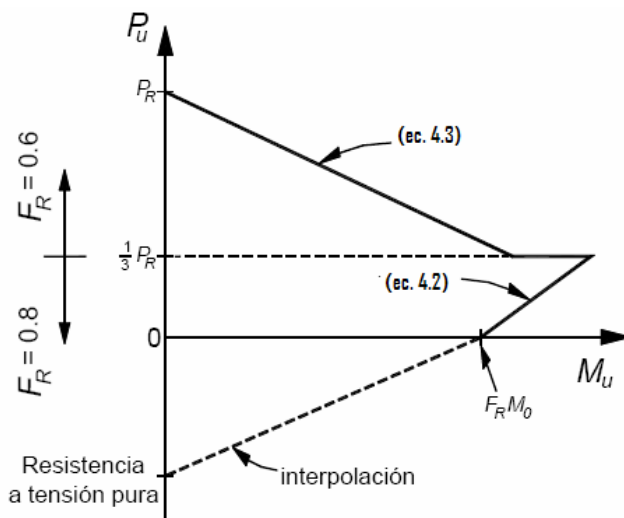


Figura 4.1. Diagrama de interacción de diseño, con el método optativo (NTCM-2004)

### 4.3 RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE MUROS CONFINADOS

Se determinó la capacidad resistente de cada muro de mampostería de acuerdo a la resistencia a compresión obtenida del ensaye de pilas para cada arreglo.

$$P_R = F_R F_E \cdot (f_m^* \cdot A_T + \Sigma A_s f_y) \quad (4.4)$$

donde:

$F_R$  es el factor de reducción de resistencia, se tomó igual a 1

$F_E$  factor de reducción por efectos de excentricidad y esbeltez, se tomó igual a 1

$f_m^*$  resistencia a compresión de la mampostería

$A_T$  área bruta de la sección transversal del muro

$A_s$  área total de acero longitudinal colocado den los castillos extremos del muro

$f_y$  esfuerzo de fluencia del acero

Se considero  $F_E$  igual a la unidad ya que esta prueba estará controlada y por lo tanto disminuirán las incertidumbres. En la tabla 4.1 se presentan las resistencias a compresión de los muros de mampostería para ambos arreglos.

**Tabla 4.1. Resistencias nominales a compresión de ambos muros.**

Muro	$A_T$ $cm^2$	$F_R$	$F_E$	$A_s$ $cm^2$	$f_y$ $kg/cm^2$	$f_m^*$ $Kg/cm^2$	$P_R$ Ton
Arreglo 1	2760	1	1	5.7	4200	16.1	68
Arreglo 2	2760	1	1	5.7	4200	16.0	68

Con los resultados obtenidos se calcularon los momentos resistentes con las ecuaciones 4.2 o 4.3.

como  $P_u \leq \frac{P_R}{3}$  utilizamos la primera ecuación.  $M_R = F_R A_s f_y d' + 0.3 P_u d$

por lo tanto, para ambos muros el momento resistente será:

Muro MCC-3

Muro MCC-4

$$M_R = M_n = 27 ton \cdot m$$

El cortante asociado al momento nominal resistente por flexocompresión para ambos muros será:

$$V_{Rf} = \frac{M_R}{h}$$

Muro MCC-3

Muro MCC-4

$$V_{Rf} = 11.7 ton$$

#### 4.4 RESISTENCIA DE DISEÑO

De acuerdo a los resultados obtenidos, el mecanismo de corte rige la resistencia de nuestros muros, por lo tanto las resistencias estimadas al primer agrietamiento son:

**Tabla 4.2. Cargas de agrietamiento de ambos muros, regidas por el mecanismo de corte.**

Muro MCC-3	Muro MCC-4
$V_{mR} = V_{mRn} = 2,910 kg$	$V_{mR} = V_{mRn} = 2,330 kg$

## 5 ENSAYE EXPERIMENTAL ANTE CARGA LATERAL DE LOS MUROS DE MAMPOSTERÍA COMBINADA UNIDOS CON MORTERO UTILIZADO EN LA AUTOCONSTRUCCIÓN

### 5.1 DESCRIPCIÓN

Los muros de mampostería contruidos en el laboratorio de la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) fueron ensayados de acuerdo con las indicaciones y recomendaciones del Apéndice Normativo A de las Normas Técnicas Complementarias Para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería.

#### 5.1.1 Construcción de los muros

Los muros se construyeron sobre un dispositivo que se encuentra en el laboratorio de la UAM diseñado para el ensaye bajo cargas laterales de muros. Para la sujeción de los muros al dispositivo se elaboró una viga de cimentación de las siguientes dimensiones: 40 cm x 80 cm x 290 cm con varillas longitudinales de una pulgada de diámetro y estribos de 3/8”.

La viga de reacción se diseño de tal manera que sirviera para la construcción de muros futuros, ya que poseía huecos en los extremos donde se anclaban los castillos y, una vez ensayados, se demolían para dejar la viga de cimentación lista para la elaboración de un nuevo muro. La viga de cimentación se ancló a la cimentación del dispositivo de carga mediante ocho varillas roscadas de 1” de diámetro (figura 5.1).



Figura 5.1. Viga de cimentación colocada en el dispositivo de ensaye.

Los muros contruidos tenían dimensiones de 2.3 m de altura por 2.3 m de largo con castillos de 12 cm x 20 cm y dalas de las mismas dimensiones. Tanto los castillos como la dala se elaboraron con varillas longitudinales de 3/8” y estribos de 2/8” separados a cada 20 cm. Los muros contaban con una pequeña losa de 10 cm de espesor, con una longitud de 230 cm y un ancho de 80 cm, en la figura 5.2 se muestran los armados de los castillos, de la dala y la losa.

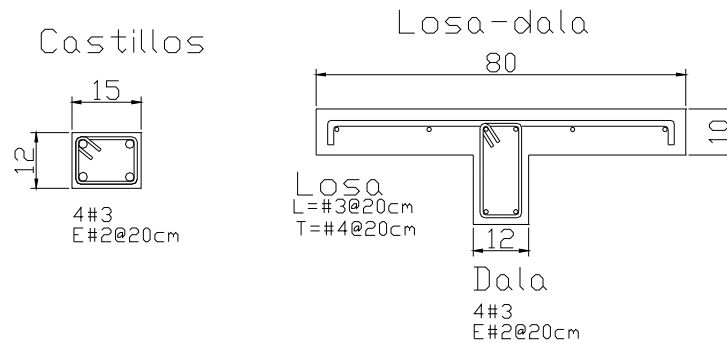


Figura 5.2. Armado de los castillos, de la dala y la losa.

La construcción de los muros comenzó con la elaboración del armado de los castillos y de la dala, posteriormente se colocaron los castillos dentro de la viga de cimentación y enseguida se inició con la pega de los bloques y los tabiques según la combinación elegida. La colocación de las piezas se realizó en una sola etapa y el tamaño de las juntas fue en promedio de 1.5 cm. Los tabiques de barro recocido fueron saturados con agua antes de su colocación para evitar que absorbieran agua del mortero utilizado.

Terminada la colocación de las piezas, se cimbraron y se colaron los castillos. Se utilizó una dosificación para el concreto de los castillos de manera que obtuviera teóricamente una resistencia de  $150 \text{ kg/cm}^2$  y se tomaron muestras para su ensaye a compresión.

Posteriormente, se cimbró la dala y la losa al mismo tiempo para que el colado fuera monolítico. El armado de la losa consistió en varillas de 3/8" de diámetro en ambas direcciones, separadas a cada 20 cm. Al igual que en el colado de los castillos se tomaron muestras del concreto utilizado en la elaboración de la dala y la losa. En la figura 5.3 y 5.4 se observan las diferentes etapas constructivas en la elaboración de los muros.



a) Viga de cimentación



b) Empotramiento de castillos y construcción de muro.



c) Cimbra y colado de castillos



d) Armado y cimbra de losa

Figura 5.3. Etapas constructivas en la elaboración de los muros.



a) Muro MCC-3



b) Muro MCC-4

Figura 5.4 Muros terminados

Para la aplicación de la carga vertical y horizontal a cada muro fue necesario diseñar una viga de placa de acero de  $\frac{1}{2}$ " de espesor con un peso aproximado de 700 kg, esta viga de acero se sujetó a la losa de los muros por medio de diez tornillos de alta resistencia de una pulgada de diámetro. Las dimensiones de la viga fueron de 40 cm de altura, 80 cm de ancho y 250 cm de largo, los detalles de la viga de acero se muestran la figura 5.5.

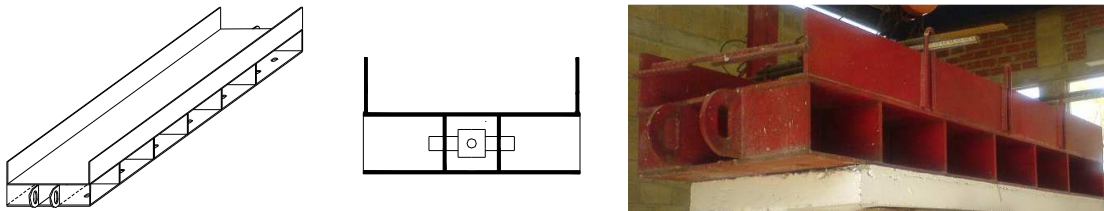


Figura 5.5. Viga de acero para la aplicación de la carga vertical y lateral.

La carga vertical aplicada a cada uno de estos muros fue de 2.2 ton aproximadamente, para un esfuerzo a compresión promedio de  $0.8 \text{ kg/cm}^2$ , para completar dicha carga se le colocaron a cada muro lingotes de acero de un peso promedio de 50 kg. El peso total de los lingotes fue de 1.2 toneladas. La carga de  $0.8 \text{ kg/cm}^2$  tomó en cuenta el peso de la viga de acero, la losa de concreto y el peso de los lingotes.

Por seguridad, la viga de acero colocada sobre el muro se sujetó por medio de cables a un marco metálico construido también en el laboratorio, figura 5.6.



a) Colocación de carga vertical



b) Colocación de viga de acero

Figura 5.6. Colocación de carga vertical y sujeción de viga de acero al marco metálico

### 5.1.2 Instrumentación

Para poder conocer las deformaciones y por lo tanto los esfuerzos a los que se ven sometidos los muros al momento del ensaye, fue necesaria una instrumentación interna por medio de deformímetros (strain gauges) y una instrumentación externa por medio de micrómetros electrónicos y una celda de carga.

#### 5.1.2.1 Instrumentación interna

Fue necesaria la instrumentación interna del muro a través de 12 deformímetros adheridos a las varillas. Estos deformímetros sirven para poder medir las deformaciones que sufrirán las varillas y, por lo tanto, conocer el nivel de esfuerzos a los que se ven sometidas al momento de la aplicación de la carga lateral. Figura 5.7.



Figura 5.7. Deformímetros electrónicos (strain gauges).

Los strain gauges estaban ubicados en los extremos de los castillos y en los extremos de las dalas por encontrarse ahí los mayores esfuerzos producto de los puntales a compresión formados por la aplicación de la carga lateral. En la figura 5.8, se muestra la ubicación de los deformímetros y la nomenclatura utilizada.

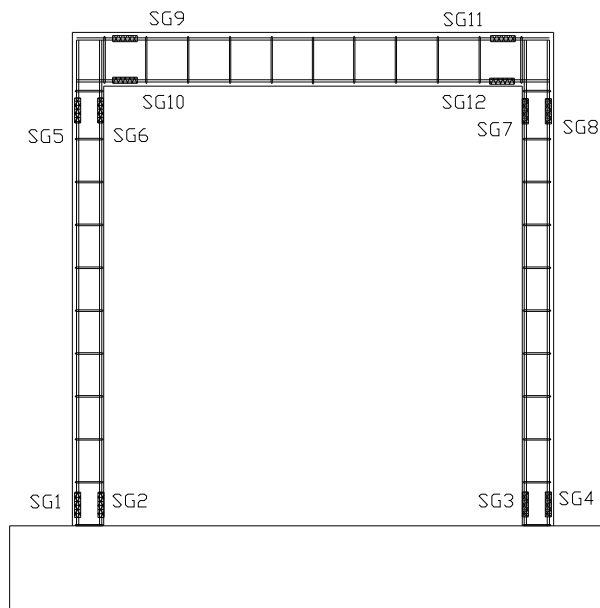


Figura 5.8. Instrumentación interna del muro.



Para poder colocar de una manera adecuada los deformímetros y evitar superficies con mucha rugosidad, fue necesario quitarle el corrugado a las varillas, lijando la porción de la varilla a instrumentar de manera que quedara una superficie lisa.

Al momento de la instrumentación se lijó la superficie con un ácido para remover cualquier óxido que pudiera formarse en la superficie. Una vez hecho esto, se aplicó un neutralizador del ácido y se procedió a pegar el deformímetro en la varilla. Por último, se le envolvió para su protección contra la humedad y contra posibles golpes. Figura 5.9.



Figura 5.9. Colocación de strain gauges en las varillas.

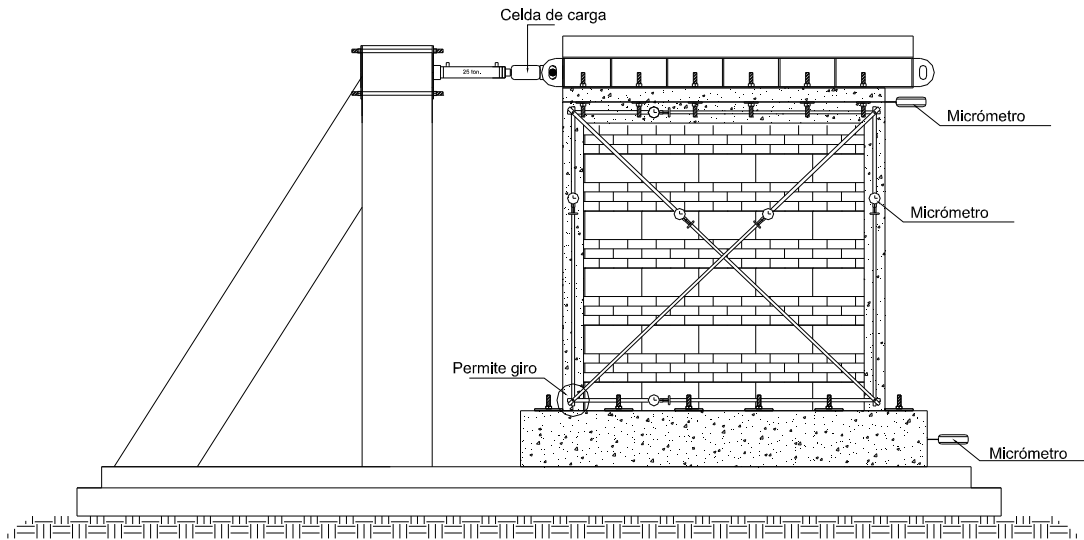
#### **5.1.2.2 Instrumentación externa**

Los muros contaban con una instrumentación externa, colocada un momento antes de su ensaye. La instrumentación externa consistió en la colocación de un total de ocho micrómetros electrónicos, seis de ellos a lo largo de los ejes de los castillos y de la dala así como en las diagonales principales del muro. También se colocó una celda de carga para tener un control de la carga aplicada a los muros a través del gato hidráulico de doble acción.

Se colocó un micrómetro en la parte superior del muro para poder medir las distorsiones al momento del ensaye. Para monitorear que la viga de cimentación no se moviera y, en caso de suceder, tomar las medidas pertinentes, se colocó un último micrómetro en la base.

En la figura 5.10 se ilustra por medio de un dibujo la colocación y la distribución de los micrómetros utilizados en los ensayos y en la figura 5.11 se aprecia la instrumentación externa consistente en la celda de carga, los micrómetros electrónicos y el equipo de adquisición de datos japonés modelo TD-300 equipado con su caja de conexión modelo ASW 30C con capacidad para 30 canales.





**Figura 5.10. Instrumentación externa del muro.**



**Figura 5.11. Instrumentación externa de muro, justo antes de su ensaye.**

### **5.1.3 Ensaye experimental**

El ensaye de los muros se llevó a cabo de acuerdo a las recomendaciones de las NTCM-2004 en el Apéndice Normativo A, para sistemas con base en muros de mampostería.

Los muros fueron probados ante una carga lateral cíclica aplicada a través de un gato hidráulico de doble acción de 25 toneladas, apoyado sobre una columna de acero del dispositivo de prueba. Se colocó una celda de carga entre el gato hidráulico y la viga de acero para poder llevar un control de la carga aplicada.

Un poco antes de la prueba se instaló la instrumentación externa. Todos los micrómetros, así como los deformímetros, se conectaron al equipo de adquisición de datos (TDS) para poder capturar las lecturas electrónicamente y transferirlas a una computadora.

La prueba se controló en la primera etapa por carga, hasta llevarlos a la carga de agrietamiento y después se controló por distorsiones. Las cargas cíclicas aplicadas en la primera etapa fueron de 25%, 50% y 100% de la carga de agrietamiento. En la segunda etapa, controlada por distorsiones, se inició con la distorsión obtenida al momento del primer agrietamiento y se continuó con incrementos del 0.1%, hasta llevarlos a un grado de daño severo. En la figura 5.12 se presentan las historias de carga y desplazamientos utilizadas en el ensaye de los muros de mampostería. En el muro MCC-4 al primer agrietamiento surgió un deslizamiento del muro por lo que el control por distorsiones comenzó con la distorsión al final del deslizamiento (.004).

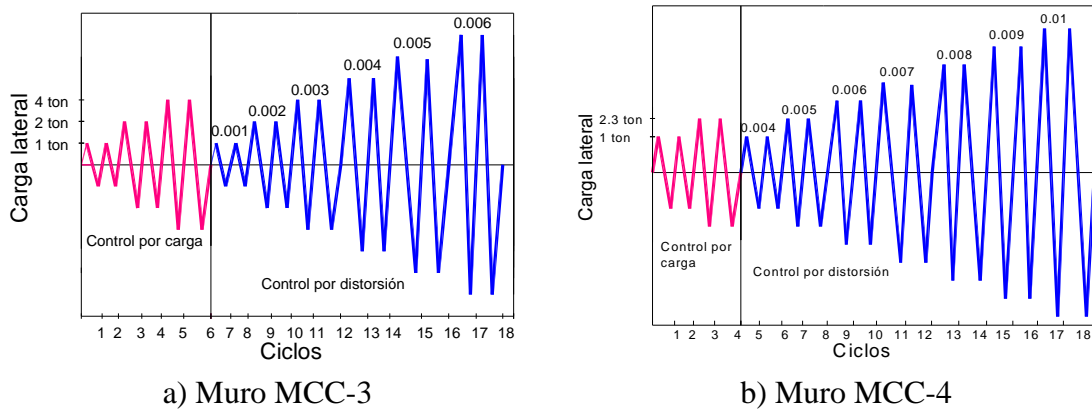


Figura 5.12. Historia de carga.

La carga vertical permaneció constante durante toda la prueba. Para cada ciclo se hizo una revisión del daño del muro, se tomaron lecturas de anchos de grietas y se tomaron fotografías del daño observado.

Otra manera de visualizar el ensayo realizado se muestra en la figura 5.13, donde se aprecian los desplazamientos impuestos a los muros. En el caso del muro MCC-4, en línea punteada se observa el último desplazamiento impuesto al muro que casi alcanzó los 4 cm, lo que significó llevarlo a un daño bastante fuerte y por ese motivo no se realizó el segundo ciclo.

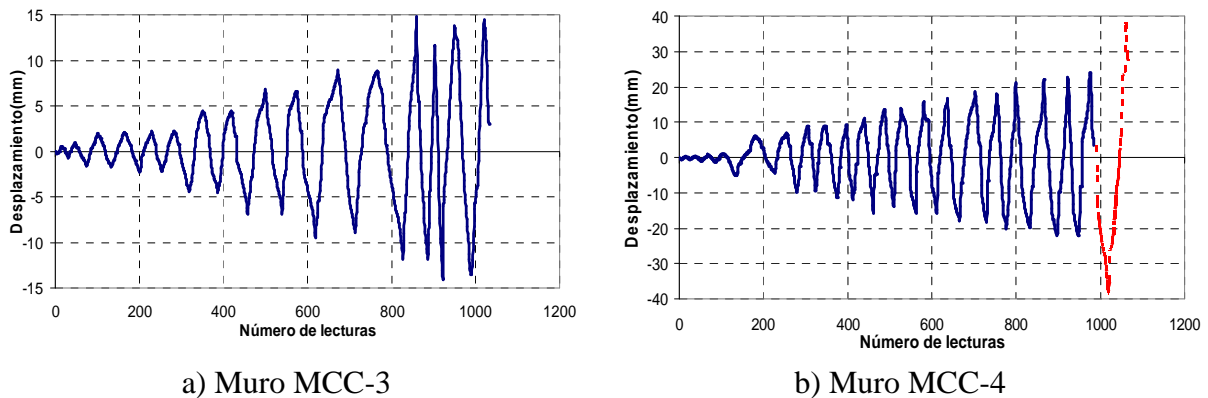


Figura 5.13. Historia de desplazamientos

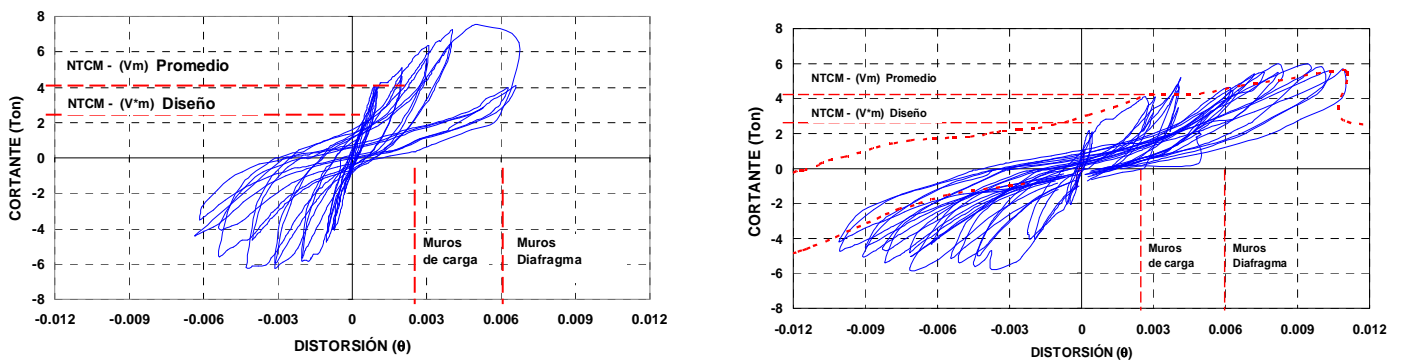
## 5.2 PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 5.2.1 Comportamiento histerético

En las curvas histeréticas se aprecia el comportamiento de los especímenes cuando se ven sujetos a una carga lateral, el decaimiento de rigidez y las distorsiones máximas que alcanzaron los muros cuando fueron ensayados. En ambas gráficas se observan los límites de distorsiones que marcan las NTCM-2004 para diseño por sismo para muros diafragmas y muros de carga, los primeros capaces de aportar rigidez lateral, rodeados de vigas y columnas, los segundos para soportar principalmente cargas verticales. A una distorsión del 3% el primer agrietamiento ya había aparecido, sin embargo el daño era reparable y los muros aun tenían capacidad de carga. (Se considera que las distorsiones permisibles de las NTCM son adecuadas para este tipo de mampostería evitando un agrietamiento de diseño excesivo).

En las gráficas se observan las cargas esperadas al primer agrietamiento, con la resistencia promedio y la resistencia de diseño para este tipo de mampostería.

En la figura 5.14 se muestran las curvas de histéresis de los dos muros ensayados.



a) Muro MCC-3

b) Muro MCC-4

Figura 5.14. Comportamiento histerético de los dos especímenes

En ambas gráficas se observa un adelgazamiento en la parte central de la curva histerética, lo que nos indica un comportamiento dominado por corte. Es evidente que el muro MCC-3 tuvo una resistencia superior que el muro MCC-2, sin embargo, el nivel de distorsión que alcanzó fue casi del doble por el desplazamiento de las piezas durante el ensayo de los muros.

Se ha considerado la falla de los muros al caer su rigidez de un ciclo a otro a más del 20 % con lo cual en el primer muro es notoria la falla del espécimen, sin embargo en el muro MCC-4 presentaba deslizamiento sobre sus juntas, y su rigidez fue cayendo poco a poco como se aprecia en los ciclos negativos.

### 5.2.1.1 Muro MCC-3

En la curva histerética de este muro se observan las cargas máximas que se registraron en el ensaye, que fueron de 7.56 ton al empujar al muro y de 6.23 ton al jalarlo.

Se observa también un decaimiento de rigidez muy marcado al llevar al muro a una distorsión del 0.5% debido a la propagación de una grieta principal en el extremo superior de uno de los castillos, penetrándolo y debilitando.

Se logró llevar al muro a una distorsión del 0.6% y su daño era bastante evidente, a ese nivel de distorsión se terminó el ensaye.



a) Agrietamiento a flexión de los castillos      b) Aplastamiento de bloques      c) Penetración del castillo

Figura 5.15. Daño observado en el ensaye del muro MCC-3.

### 5.2.1.2 Muro MCC-4

En este muro se obtuvieron menores resistencias, sus valores fueron de: 5.8 ton al empujarlo y de 6.0 ton al jalarlo con el gato hidráulico. El mayor decaimiento de rigidez de este muro se dio en los primeros ciclos de carga; sin embargo, se logró llevar al muro hasta una distorsión del 0.10 %.

Con el fin de llevar al muro a un nivel mucho mayor de daño, se aplicó un último ciclo (que se muestra en línea punteada) y se llevó hasta una distorsión de casi 1.7%. La forma del último ciclo se debió a algunos problemas en el micrómetro que controlaba las distorsiones, ya que al empujar el muro hasta esa distorsión el émbolo del micrómetro se pandeó y se dobló, atorándose y dejando de medir por unos instantes.

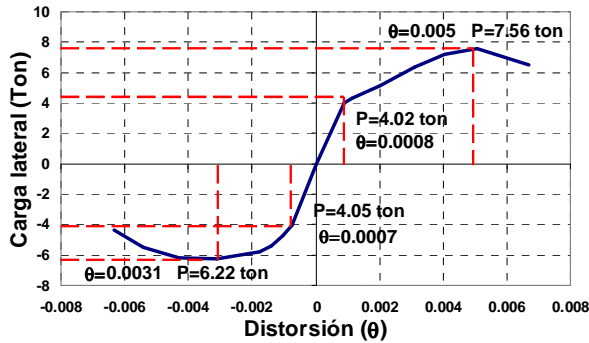


a) Agrietamiento a flexión de los castillos      b) Aplastamiento de bloques      c) Penetración del castillo

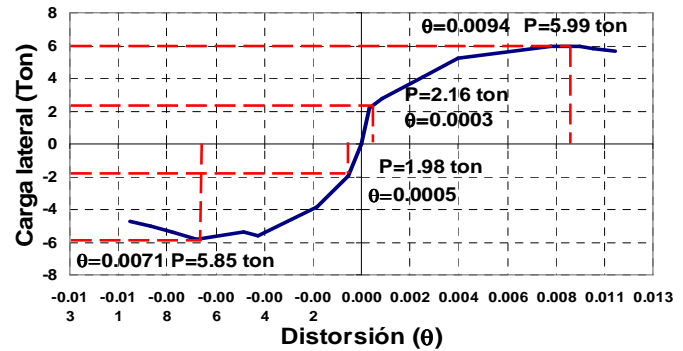
Figura 5.16. Daño observado en el ensaye del muro MCC-4.

### 5.2.2 Envolvente de la curva carga lateral-distorsión

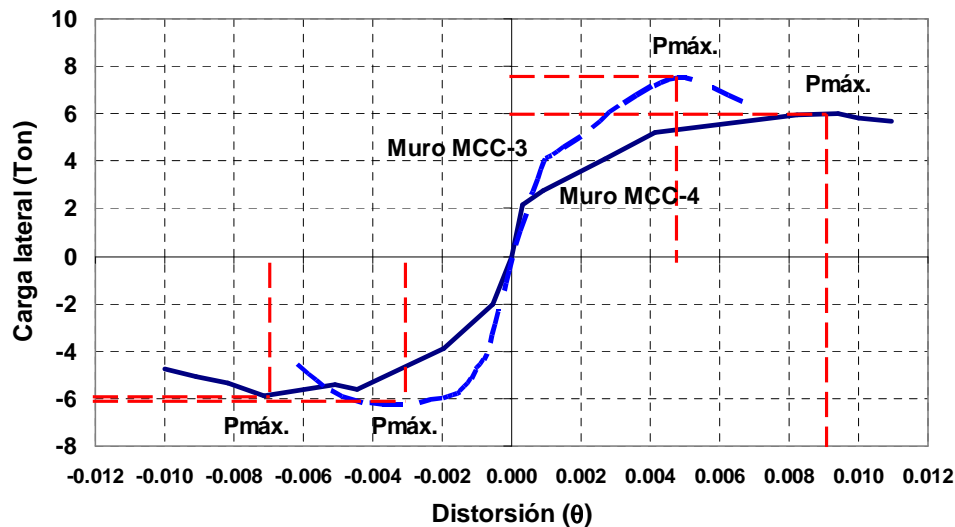
En la figura 5.17 se observan las envolventes de las curvas de histéresis de los muros ensayados, aquí se observan las cargas máximas registradas y su correspondiente distorsión en el empuje o el jale del muro. Se observa que el muro MCC-4 alcanza casi el doble de la distorsión que el muro MCC-3; sin embargo, su resistencia es menor. En la figura 5.17c están graficadas ambas curvas y se aprecia de manera mas clara, la menor resistencia y la mayor distorsión del muro MCC-4.



a) Muro MCC-3



b) Muro MCC-4



c) Gráfica comparativa.

Figura 5.17. Gráfica comparativa de envolventes, carga lateral-distorsión.

### 5.2.3 Degradación de rigidez

Cuando un evento sísmico afecta a una estructura impone desplazamientos en ella, lo que genera esfuerzos en los materiales, al no poder soportarlos, el material comienza a ceder, una manera de observar tal fenómeno es el agrietamiento. Cuando una estructura se va agrietando su rigidez va disminuyendo y en el caso de la mampostería dicha rigidez cae de manera importante después del primer agrietamiento, por ser un material frágil que no



admite grandes deformaciones. En la figura 5.18 se presenta la degradación de rigidez para los ciclos y sus repeticiones de cada muro en función de la distorsión impuesta.

El muro MCC-3 presentó una degradación de rigidez menos súbita que el muro MCC-4, ya que la aparición de grietas principales siguió después del primer agrietamiento, en cambio, el muro MCC-4 tuvo un agrietamiento mas marcado al primer agrietamiento y las grietas que siguieron apareciendo fueron haciendo notar aun más la grieta principal. En ambos muros, para una distorsión de 0.4% tenían menos del 30% de la rigidez inicial.

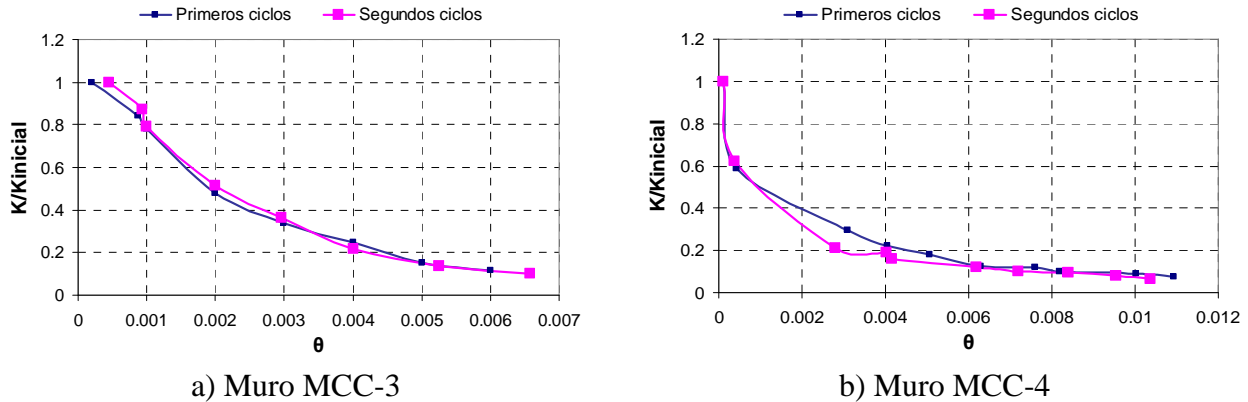


Figura 5.18. Decaimiento de rigidez.

La rigidez de cada ciclo fue calculada como la pendiente de la secante que une los dos puntos de máxima distorsión en sentido positivo y negativo de cada ciclo.

En la figura 5.19 se observa el agrietamiento de ambos muros al tener una distorsión de 0.4%, a ese nivel de agrietamiento estos muros poseían menos del 30% de su rigidez original.

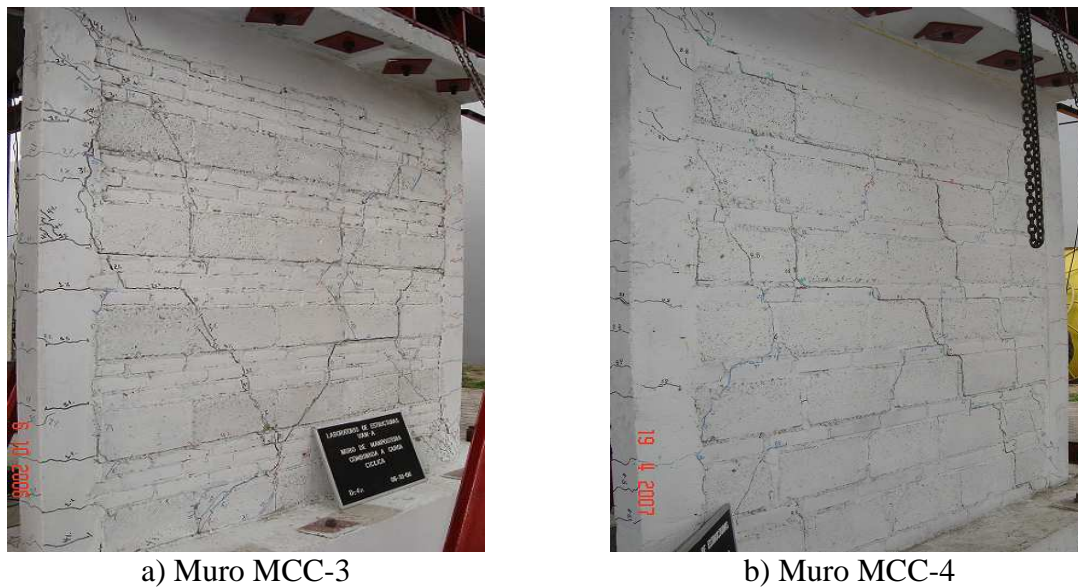


Figura 5.19. Agrietamiento al 0.4% de distorsión.

### 5.2.4 Disipación de energía

Las estructuras pueden disipar energía través de su deformación, las fracturas y el agrietamiento que les va produciendo algún evento sísmico y se puede entender con el concepto de un amortiguamiento equivalente, y/o empleando algún dispositivo especial encargado de proveer amortiguamiento adicional.

#### 5.2.4.1 Energía de deformación

Este parámetro es importante, ya que a través de él, podemos obtener la energía que se genera al llevar a un material (en este caso el muro) al límite del intervalo elástico, lo que se asocia, a la energía que se desprende del trabajo realizado. De igual forma se puede conocer la energía disipada asociada al daño en los muros, por su incursión en el intervalo de comportamiento no lineal.

La energía de deformación fue obtenida a partir de la integración en el cuadrante negativo de la envolvente de la curva carga deformación, para ambos muros, figura 5.20 y 5.21.

#### - Energía de deformación elástica

Es la energía recuperable, dado que no se causa daño al muro, se obtuvo a partir de la integración del área bajo la curva en el intervalo elástico.

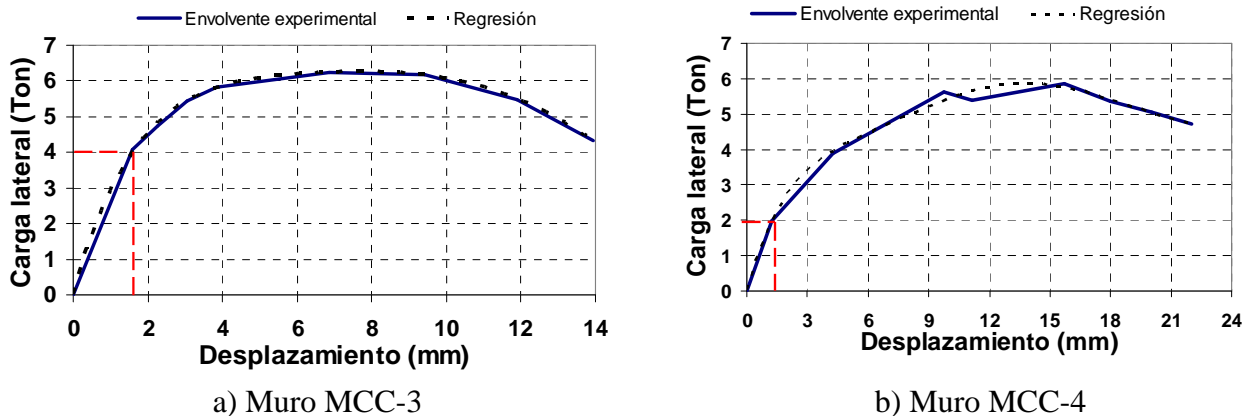


Figura 5.20. Energía de deformación elástica

Como se aprecia la energía de deformación elástica es mayor para el muro MCC-3 a diferencia del muro MCC-4.

Muro MCC-3

$$U_r = \int_0^{1.6} 0.0001x^5 - 0.0065x^4 + 0.1093x^3 - 0.8923x^2 + 3.6681x dx$$

$$U_r = 3.64 \text{ ton} \cdot \text{mm}$$

*Muro MCC-4*

$$U_r = \int_0^{1.4} 2 \cdot 10^{-5} x^5 - 0.0012 x^4 + 0.0275 x^3 - 0.3003 x^2 + 1.8148 x dx$$

$$U_r = 1.201 \text{ ton} \cdot \text{mm}$$

**- Energía de deformación de fractura**

La energía de deformación de fractura es la energía producto de la incursión de los muros a su intervalo de comportamiento inelástico, es la energía asociada al daño en los muros.

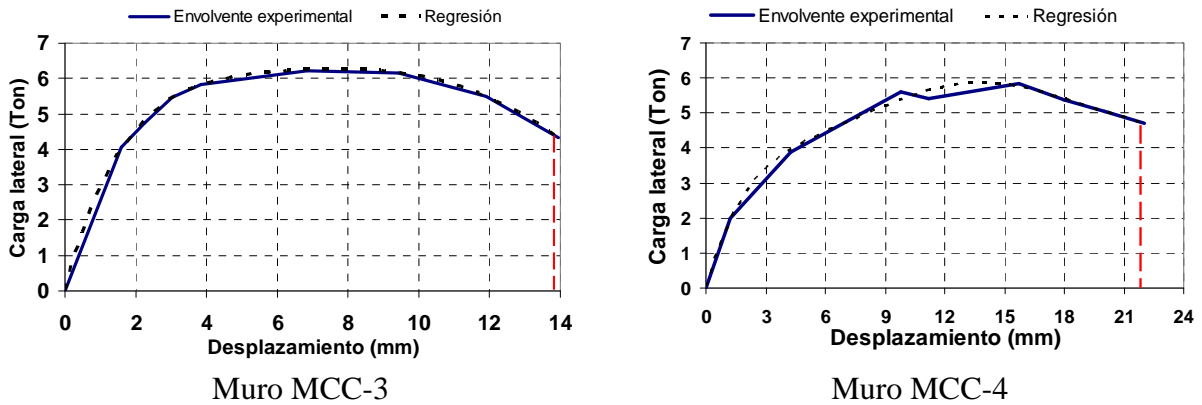


Figura 5.21. Energía de deformación de fractura

*Muro MCC-3*

$$U_r = \int_0^{13.9} 0.0001 x^5 - 0.0065 x^4 + 0.1093 x^3 - 0.8923 x^2 + 3.6681 x dx$$

$$U_r = 72.81 \text{ ton} \cdot \text{mm}$$

*Muro MCC-4*

$$U_r = \int_0^{1.4} 2 \cdot 10^{-5} x^5 - 0.0012 x^4 + 0.0275 x^3 - 0.3003 x^2 + 1.8148 x dx$$

$$U_r = 95.606 \text{ ton} \cdot \text{mm}$$

De los resultados obtenidos se observa que el muro MCC-4 desprende mayor energía de deformación ya que alcanzó una distorsión de 1%.

**5.2.4.2 Energía disipada equivalente**

De acuerdo al apéndice normativo A de las NTCM-2004 la energía disipada equivalente, se calcula para piezas huecas para el ciclo de histéresis correspondiente al 0.4% de distorsión y para piezas macizas al 0.6% de distorsión. Se calculó esta energía al 0.6% de distorsión por tratarse de piezas macizas.



Esta energía se calcula como el área del ciclo de histéresis al 0.6% de distorsión entre el área encerrada por el cuadrilátero formado por líneas con rigideces iguales a las que tiene el primer ciclo en el empuje y el jale del muro, figura 5.22.

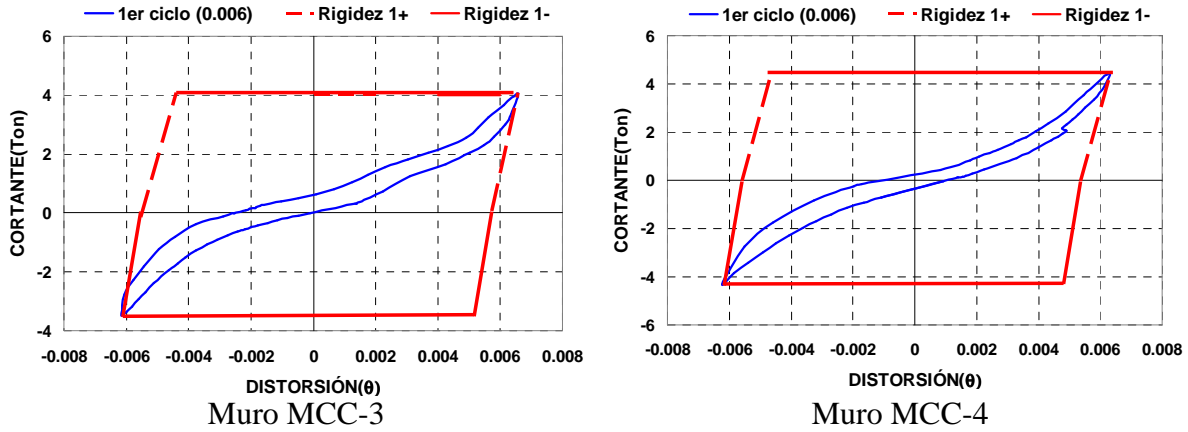


Figura 5.22. Energía disipada equivalente

La energía disipada equivalente se define de la siguiente forma (NTCM-2004):

$$EDE = \frac{A_c}{A_p}$$

donde

$A_c$  = área encerrada dentro del ciclo de histéresis al 0.6% de distorsión

$A_p$  = área circunscrita por los paralelogramos definidos por la rigidez del primer ciclo

Por lo tanto para el muro MCC-3 se tiene:

$$EDE = \frac{A_c}{A_p} = \frac{0.0090}{0.0827} = 0.108$$

Para el muro MCC-4 se tiene:

$$EDE = \frac{A_c}{A_p} = \frac{0.0085}{0.0948} = 0.089$$

#### 5.2.4.3 Energía histerética acumulada

La manera de representar a la energía total que se disipa en el ensayo de los muros es a través de la energía histerética acumulada. Esta energía es la suma de las áreas de los ciclos de histéresis hasta finalizar el ensayo.

En la figura 5.24 se observan las graficas para los dos muros ensayados y en la figura 5.23 se comparan las graficas de los muros con sus respectivas repeticiones de los ciclos.

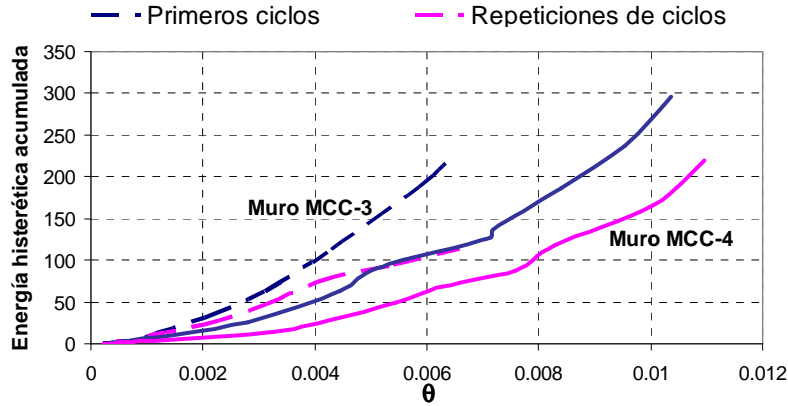


Figura 5.23. Gráfica comparativa, muro MCC-3 y muro MCC-4, Energía histerética acumulada

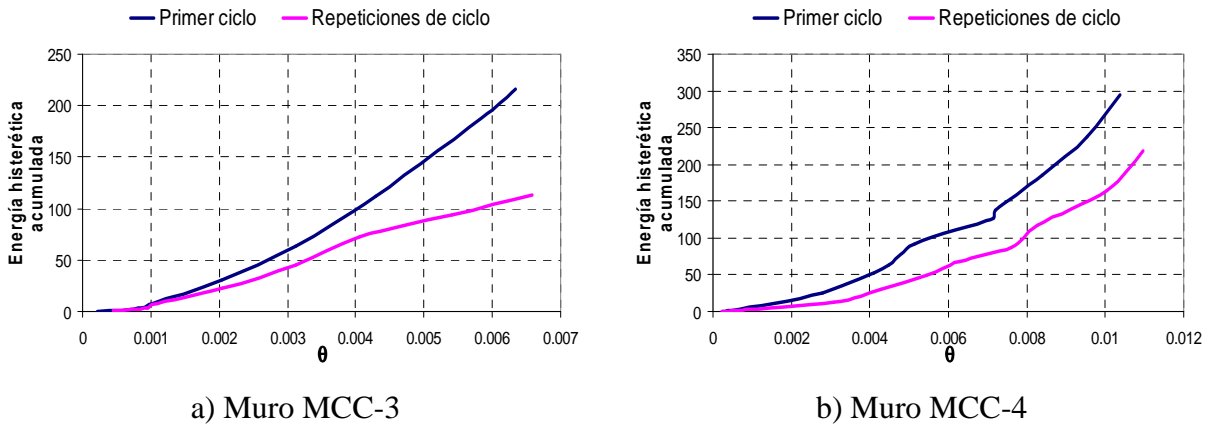


Figura 5.24. Energía histerética acumulada

De la figura 5.23 se aprecia que el muro MCC-4 tuvo una mayor acumulación de energía, ya que alcanzó distorsiones mucho más grandes que el muro MCC-3.

La energía histerética acumulada para el muro MCC-3 fue de 220 ton-mm para los primeros ciclos y de 110 ton-mm para sus repeticiones de ciclo.

La energía para el muro MCC-4 fue de 295 ton-mm para los primeros ciclos y de 220 ton-mm para sus repeticiones de ciclo.

De las gráficas se observa que en ambos casos la mayor acumulación de energía se da para los primeros ciclos.

### 5.2.5 Amortiguamiento viscoso equivalente

El amortiguamiento viscoso equivalente es la representación conjunta del mecanismo de disipación de energía debido a la aparición de grietas en los elementos estructurales, la

apertura y cierre de estas grietas durante un evento sísmico, la fricción en las conexiones, la fricción entre elementos no estructurales, etc.

La forma de incluir la disipación de energía debida a cada uno de estos mecanismos en modelos analíticos se hace a través del amortiguamiento viscoso equivalente representado por la siguiente ecuación.

$$\xi_{eq} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_{SO}} \quad (5.1)$$

donde:

$\xi_{eq}$       Porcentaje de amortiguamiento viscoso equivalente  
 $E_D$       energía del ciclo histerético  
 $E_{SO}$       energía de deformación elástica equivalente

La representación grafica del cálculo del amortiguamiento viscoso se presenta en la figura 5.25.

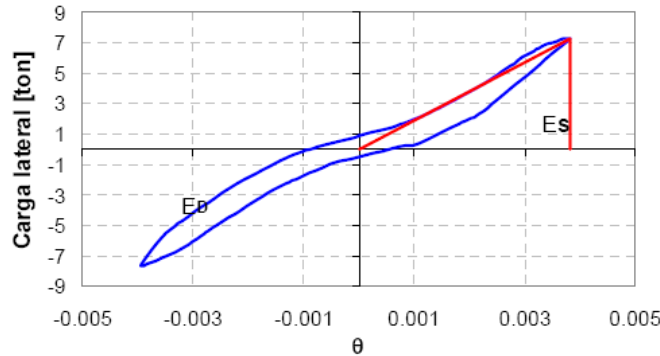


Figura 5.25. Representación grafica del cálculo del amortiguamiento viscoso equivalente (Juárez 2005).

Con la finalidad de conocer como varía el amortiguamiento viscoso equivalente a medida que transcurría el ensaye de los muros, se obtuvo el amortiguamiento para cada ciclo y para sus respectivas repeticiones. Las curvas obtenidas para el amortiguamiento en cada ciclo se presentan en la figura 5.26, el amortiguamiento acumulado se observa en la figura 5.27, donde se aprecia que el amortiguamiento se incrementa debido al agrietamiento.

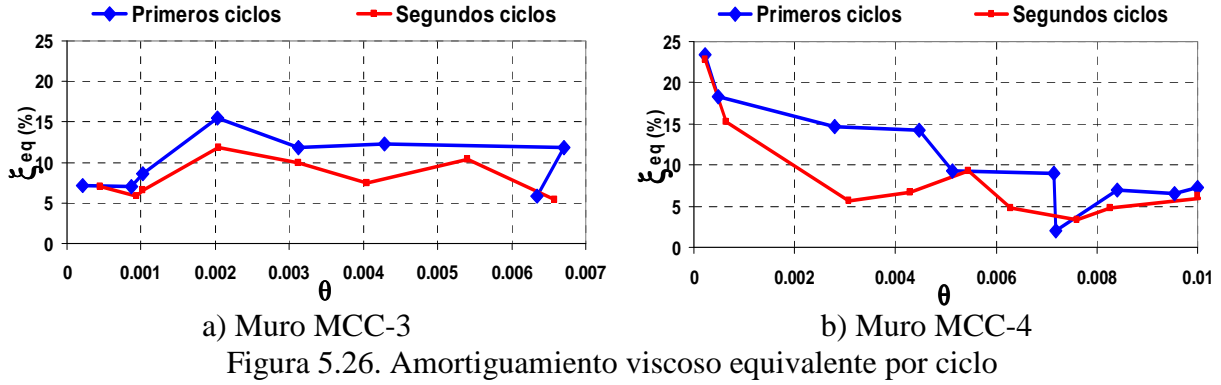


Figura 5.26. Amortiguamiento viscoso equivalente por ciclo

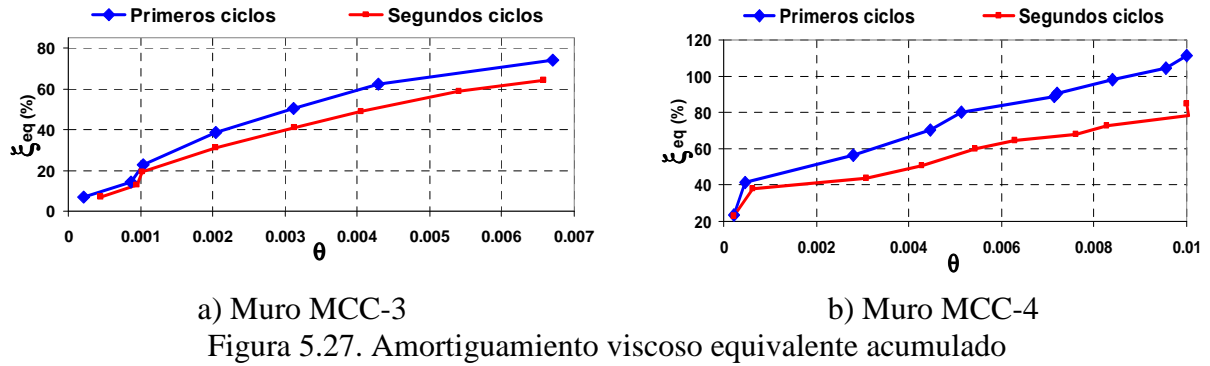


Figura 5.27. Amortiguamiento viscoso equivalente acumulado

En la gráfica que representa el amortiguamiento del muro MCC-3 se aprecia un amortiguamiento inicial similar incrementándose hasta una distorsión del 0.2%, distorsión a la cual se presentó el primer agrietamiento. Toda vez agrietado el muro, su amortiguamiento se mantuvo constante en casi un 12% para los primeros ciclos y de un 10% para sus respectivas repeticiones.

En la grafica del muro MCC-4 se observa que los amortiguamientos para los primeros ciclos y sus repeticiones son los más altos y van disminuyendo conforme las distorsiones se hacen más grandes, estabilizándose en un porcentaje del 7% para distorsiones muy grandes. Esto se debe a que a distorsiones grandes, las grietas están bastante abiertas, por lo que deslizan sin hacer mucho contacto entre ellas, por lo que la fricción efectiva disminuye.

En ambas muros se aprecia que: (1) el amortiguamiento viscoso equivalente es en general superior al 5% supuesto por los reglamentos para todo el intervalo de distorsiones considerado y, (2) en general, el amortiguamiento es inferior para las repeticiones de los ciclos de distorsión.

### 5.3 ÍNDICE DE DAÑO DE KWOK Y ANG

El daño sísmico en la mampostería es causado principalmente por cortante o, en algunos casos, por la flexión generada en el plano o fuera del plano de los muros.

La falla de los muros de mampostería es iniciada por el agrietamiento debido a la tensión diagonal o al deslizamiento en las juntas. El incremento en el agrietamiento conduce a un decremento en la capacidad de carga del muro.

Kwok y Ang (Tena *et al.* 2007) proponen un modelo que representa el índice de daño de la mampostería en función de la capacidad última de deformación y de la disipación de energía. Aunque este modelo fue obtenido mediante los parámetros de muros de mampostería no reforzada elaborados únicamente con tabiques de barro recocido, se hará el ajuste con los parámetros obtenidos con los muros de mampostería combinada.

El daño sísmico en la mampostería puede ser expresado como una función del daño causado por una deformación excesiva y por la disipación de energía. Según Kwok y Ang, esto puede ser expresado en términos de un índice de daño de acuerdo a las siguientes ecuaciones.

$$D = D_u + D_e \quad (5.2)$$

donde:

$$D_u = \frac{u_m}{u_f} \quad (5.3)$$

$$D_e = \varepsilon \frac{\int dE}{q_u u_f} \quad (5.4)$$

donde:

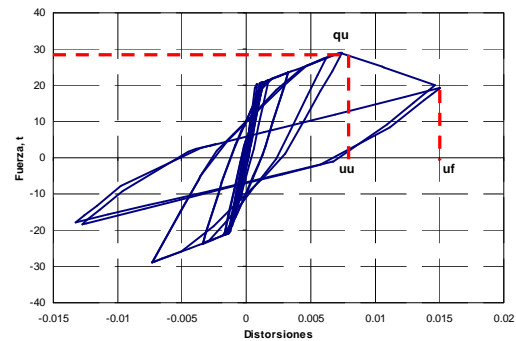
$u_m$  Deformación de la respuesta máxima

$u_f$  Deformación al punto donde se ha considerado la falla del espécimen

$\int dE$  Energía histerética acumulada

$q_u$  Capacidad última a corte

$\varepsilon$  Constante



De acuerdo a la ecuación 5.2, se plantea el daño estructural en función de los parámetros de respuesta  $u_m$  y  $\int dE$  y de los parámetros estructurales de los ensayos,  $u_f$ ,  $q_u$ .

De los ensayos experimentales realizados a los muros MCC-3 y MCC-4 se determinaron las variables estructurales de las envolventes de las curvas de histéresis. Obteniéndose los siguientes valores (Juárez 2007, Tena *et al.* 2007):

**Tabla 5.1. Capacidad última a corte y deformación última**

<b>Muro</b>	<b><math>q_u</math></b>	<b><math>u_u</math></b>
MCC-3	4322 kg	11 mm
MCC-4	4725 kg	20.6 mm

De acuerdo a Kwok y Ang el desplazamiento a la falla  $u_f$  es un múltiplo del desplazamiento último, correspondiente a  $q_u$ , por simplicidad:

$$u_f = \alpha \cdot u_u$$

En la cual  $\alpha$  es una constante y el desplazamiento último  $u_u$  es obtenido como:

$$u_u = \lambda_c q_u / k_{ic}$$

Donde  $k_{ic}$  es la rigidez inicial del muro, el factor  $\lambda_c$  fue calculado para todos los ensayos donde  $u_u$  fue obtenido, de los ensayos experimentales se obtuvo una regresión lineal en función del esfuerzo vertical a compresión y la resistencia de la mampostería

$$\lambda_c = 1 / (0.052 + 0.82 \sigma_c / f'_m)$$

Para todos los muros que se ensayaron a la falla ( $D > 1$ ) el valor de  $\alpha$  se calculó para valores dados de  $\varepsilon$ . La falla se asumió cuando el espécimen sufrió una significativa reducción de la capacidad de carga o la resistencia lateral se debía solamente a la fricción.

Para sus ensayos de muros de mampostería observó que el valor de  $\alpha$  tenía muy poca variación:

$$\alpha = 1.47 \text{ y } \varepsilon = 0.075$$

Para nuestros muros obtenemos las deformaciones a la falla:

Muro MCC-3

$$u_f = 16.17 \text{ mm}$$

Muro MCC-4

$$u_f = 30.3 \text{ mm}$$

Para nuestros muros se consideró tomar una constante de  $\varepsilon = 0.047$  de acuerdo con Juárez (2007), donde se ensayaron dos especímenes de mampostería combinada, como los estudiados en esta investigación, ya que Kwok y Ang proponían  $\varepsilon = 0.075$  para mampostería de tabique no reforzada.

Juárez con los datos de los muros ensayados, calculó la energía, obtuvo las deformaciones máximas y las deformaciones a la falla, con lo que calculó  $\varepsilon$  para este tipo de mampostería.

Cabe mencionar que ha sido una calibración preliminar, ya que en ese momento solamente se contaban con dos muros, una mejor calibración y con un numero mayor de resultados se podrían obtener valores mas reales para este tipo de mampostería.

Kwok y Ang, proponen los intervalos para el índice de daño de la tabla 5.2.

**Tabla 5.2. Valores propuestos para el índice de daño de Kwok y Ang**

	SIN DAÑO	DAÑO REPARABLE	DAÑO SEVERO	COLAPSO INMINENTE
D	0	0 a 0.25	0.25 a 1.0	$\geq 1.0$

De acuerdo con Juárez (2007), quien tomó tres criterios para determinar si la distorsión a la que se somete el muro es reparable (distorsión permisible según NTCM-2004, deterioro de propiedades estructurales en muros de acuerdo con Ruiz García (1995), deterioro de los especímenes ensayados) se tiene para esta mampostería una distorsión de 0.003, con la cual se hace una ampliación del intervalo de daño reparable propuesto por Kwok y Ang para este tipo de mampostería ( $D=0.4$ ).

En las figuras 5.28 y 5.29 se aprecian los límites propuestos por Kwok y Ang y los límites establecidos de acuerdo con Juárez para esta mampostería.

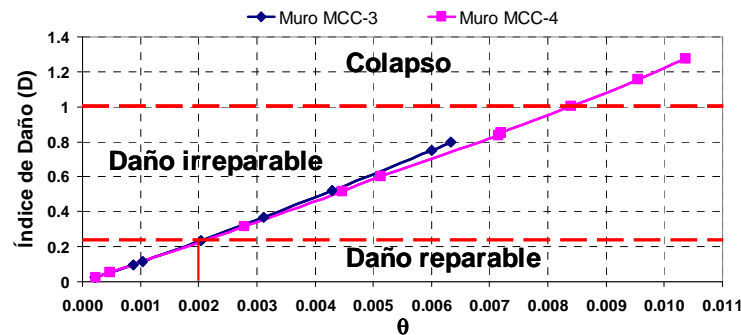


Figura 5.28. Intervalo de índices de daño Kwok y Ang.

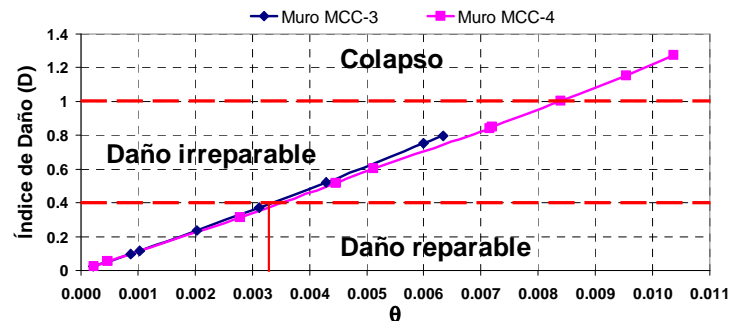


Figura 5.29. Intervalo de índice de daño ajustado para esta mampostería según Juárez (2007).

En el estudio de Juárez (2007), de acuerdo con los criterios y las observaciones del agrietamiento de los muros, se amplió el intervalo de daño reparable, ya que el índice de

daño de  $D = 0.25$  que propone Kwok y Ang que corresponde a una distorsión del 0.02% resulta muy reducido y se observó que los daños en esta mampostería a esa distorsión son fácilmente reparables.

De acuerdo con los ensayos realizados en esta investigación y de acuerdo con lo observado experimentalmente en los muros MCC-3 y MCC-4, la modificación que hizo Juárez corresponde adecuadamente con los límites para considerar un daño reparable en la mampostería.

Hasta una distorsión de 0.3% la mampostería combinada posee agrietamiento moderado y es fácilmente reparable. A partir de 0.3% de distorsión, la mampostería se va agrietando cada vez más, comienza a haber aplastamiento de algunas piezas, las grietas comienzan a penetrar los castillos y el deterioro es notorio. Para distorsiones mayores de 0.8% las grietas han comenzado a dañar fuertemente los castillos y es preocupante la inestabilidad de los muros, en el caso el muro MCC-3 se logro llevar tan solo a una distorsión de 0.6% y el muro MCC-4 hasta una distorsión de 0.1% así que el límite de 0.8% que considera el colapso de los muros es un poco conservador para muros que poseen mayor cantidad de bloques que de tabiques, ya que se observo experimentalmente que el muro MCC-4 tuvo mayor cantidad de bloque y más capacidad de deformación que el muro MCC-3.

De acuerdo a la ecuación de Kwok y Ang se aprecia que a pesar de que en las pruebas de la mampostería se hicieron varios ciclos de carga y que una parte del índice de daño de su modelo se basa en la energía histerética absorbida el parámetro que más afecta a este índice es la distorsión, es decir el daño sísmico en la mampostería se ve mas seriamente afectado por la deformación excesiva, ósea que para controlar el daño en la mampostería basta con controlar adecuadamente la distorsión.

$$D_u \geq D_e \quad (5.5)$$

$$D_u = \frac{u_m}{u_f} \geq D_e = \varepsilon \frac{\int dE}{q_u u_f} \quad (5.6)$$

#### **5.4 PATRONES DE AGRIETAMIENTO**

El agrietamiento es una manifestación de la pérdida de resistencia y rigidez de los elementos estructurales debido a la imposición de desplazamientos a las estructuras, ya sea por hundimientos diferenciales o por eventos sísmicos.

Las estructuras de mampostería presentan un agrietamiento marcado bajo distorsiones pequeñas.

Para facilitar la comparación del daño de los muros, en la figura 5.30 se muestran los patrones de agrietamiento de los dos muros ensayados.



En ambos especímenes el daño estuvo dominado por grietas diagonales en las dos direcciones hasta llegar a penetrar los castillos. En los primeros niveles de carga aparecieron pequeñas grietas a flexión en los castillos, posteriormente se observó aplastamiento en algunas piezas de bloque por tener una baja resistencia a la compresión. En ningún caso la parte central de la dala sufrió agrietamiento.

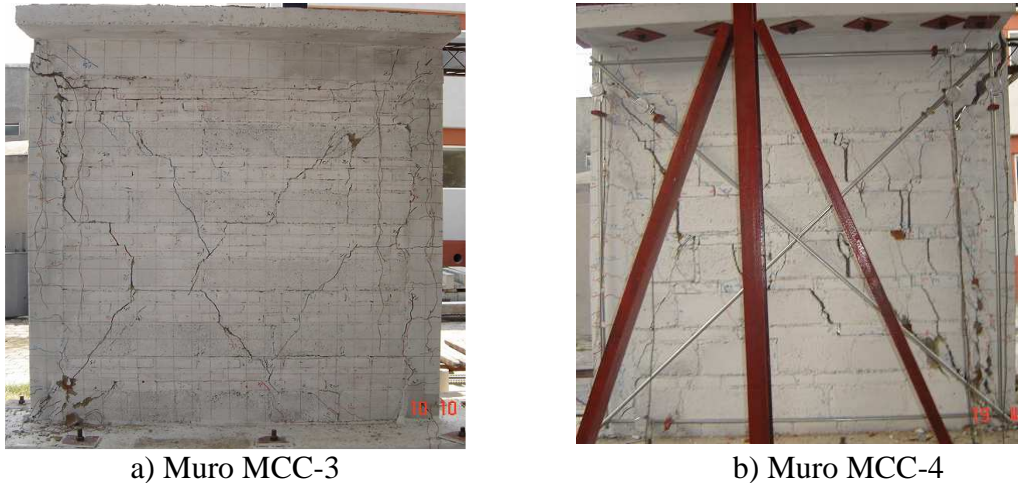


Figura 5.30. Patrones de agrietamiento de los muros ensayados

Para el muro MCC-3, el primer agrietamiento diagonal apareció a una carga de 4 Ton; a partir de esta carga de agrietamiento se comenzó con el control por distorsiones. En la parte media del muro se presentaron deslizamientos entre los bloques y las piezas de tabique debido a una mala adherencia.

Al alcanzar una distorsión del 0.5% apareció una grieta que penetró en la parte superior del castillo. Esta grieta fue la causante de la pérdida de su rigidez de manera súbita, como se observará en las curvas de histéresis presentadas mas adelante.

El agrietamiento del muro MCC-4 comenzó en una de las diagonales principales del muro a una distorsión de 0.05%. Las grietas siguieron las juntas de las piezas. Al controlar la prueba por desplazamientos, comenzaron a aparecer en los castillos pequeñas grietas de flexión y también comenzaron a penetrar la parte superior de los castillos. La penetración de los castillos fue más marcada en uno de ellos, esto hizo que se perdiera mucha de su rigidez. Al 0.7% de distorsión el muro comenzó a comportarse como cuerpo rígido, la aparición de grietas fue menos evidente y las grietas existentes comenzaron solamente a abrirse y cerrarse.

## 5.5 CRITERIOS DE ACEPTACIÓN DE ACUERDO A LAS NTCM-2004, PARA LOS MUROS PRESENTADOS EN ESTA INVESTIGACIÓN Y COMPARACIÓN CON MUROS ELABORADOS PREVIAMENTE (CAPÍTULO III).

Para hacer la evaluación del desempeño de los muros ensayados se revisan los criterios de aceptación de las NTCM-2004, considerando que se comportaron satisfactoriamente si se cumplen todos ellos.

En las tablas siguientes se presentan las evaluaciones de los criterios de aceptación para los muros reportados en esta investigación y se realiza una comparación con los criterios de aceptación reportados para los muros descritos en el capítulo III.

**Criterio A.9.1.** Los muros ensayados alcanzan una resistencia,  $R_{\max}$ , igual o mayor a la calculada,  $R$ , para una distorsión menor o igual que 0.006 para piezas macizas.

**Tabla 5.3. Criterio A.9.1. Comparación de resistencias**

	Resistencia calculada (kg)	Resistencia máxima (kg)	Criterio
Muro MCC-3	P=2,426	( $\theta=0.0031$ ) $P_{\max}=6220$	<b>OK</b>
Muro MCC-4	P=4,206	( $\theta=0.005$ ) $P_{\max}=5700$	<b>OK</b>
<b>MUROS DE MAMPOSTERIA COMBINADA MORTERO TIPO I (CAP. III)</b>			
Muro MCC-1	P=4,215.5	( $\theta=0.0057$ ) $P_{\max}=7600$	<b>OK</b>
Muro MCC-2	P=4,215.5	( $\theta=0.005$ ) $P_{\max}=8353$	<b>OK</b>

Ambos tipos de muros, los construidos con un mortero tipo I (Muros MCC-1 y MCC-2) y los muros construidos con un mortero usado comúnmente en la autoconstrucción (Muro MCC-3 y MCC-4) tuvieron una resistencia máxima mayor a la resistencia calculada.

**Criterio A.9.2.** La resistencia medida,  $R_{\max}$ , es menor que  $\lambda R$ , en el cual  $\lambda$  es el factor de sobre resistencia para las conexiones, en este caso  $\lambda=1.3$ .

**Tabla 5.4. Criterio A.9.2. Comparación de resistencias**

	$\lambda R$ (kg)	Resistencia máxima (kg)	Criterio
Muro MCC-3	P=3153	( $\theta=0.0031$ ) $P_{\max}=6220$	<b>NO CUMPLE</b>
Muro MCC-4	P=5468	( $\theta=0.005$ ) $P_{\max}=5500$	<b>NO CUMPLE</b>
<b>MUROS DE MAMPOSTERIA COMBINADA MORTERO TIPO I (CAP. III)</b>			
Muro MCC-1	P=5480.2	( $\theta=0.0057$ ) $P_{\max}=7600$	<b>NO CUMPLE</b>
Muro MCC-2	P=5480.2	( $\theta=0.005$ ) $P_{\max}=8353$	<b>NO CUMPLE</b>

**Criterio A.9.3.** Las características de la repetición del ciclo a una distorsión de 0.006 para piezas macizas deberán de cumplir con lo siguiente:

a) La carga de la repetición sea por al menos igual a  $0.8R_{\text{máx}}$  en el mismo sentido de la carga.

**Tabla 5.5. Criterio A.9.3. Comparación de resistencias**

	$R_{\text{máx}}^I$ ( $\theta \leq 0.006$ )	$R_{\text{máx}}^I(0.8)$		R Repeticiones de ciclo	Criterio
Muro MCC-3	6.22 ton	4.97 ton	$\leq$	4.057(ton)	<b>NO CUMPLE</b>
Muro MCC-4	5.7 ton	4.56 ton	$\leq$	4.311(ton)	<b>NO CUMPLE</b>
<b>MUROS DE MAMPOSTERIA COMBINADA MORTERO TIPO I (CAP. III)</b>					
Muro MCC-1	P=7759.2	6207.4	$\leq$	7600.8	<b>OK</b>
Muro MCC-2	P=8353.6	6682.88	$\leq$	7435.1	<b>OK</b>

<sup>I</sup> valores en el cuadrante negativo, empuje del muro

Los muros MCC-3 y MCC-4 se encuentran muy cerca de el limite del criterio de aceptación; sin embargo, estrictamente no cumplen con este criterio.

b) La energía disipada equivalente no deberá ser menor de 0.15.

Esta energía se refiere al área encerrada bajo curva de la repetición del ciclo de histéresis al 0.6% de distorsión entre el área circunscrita por el cuadrilátero formado por las rigidez positiva y negativa del primer ciclo, como se aprecia en la figura 5.22.

**Tabla 5.6. Criterio A.9.3. Comparación de energía disipada equivalente**

MURO	Área del ciclo ( $\theta=0.006$ ) Ton-mm	Área del polígono Ton-mm	Energía disipada Equivalente		Criterio
MCC-3	19.8	181.9	0.108	< 0.15	<b>NO CUMPLE</b>
MCC-4	18.7	208.56	0.089	< 0.15	<b>NO CUMPLE</b>
<b>MUROS DE MAMPOSTERIA COMBINADA MORTERO TIPO I (CAP. III)</b>					
MCC-1	55.11	237.04	0.233	> 0.15	<b>OK</b>
MCC-2	56.26	176.3	0.319	> 0.15	<b>OK</b>

Los ciclos de los muros MCC-3 y MCC-4 fueron más angostos debido al deslizamiento de los muros por la baja fricción en sus juntas, por tal razón no cumplen con éste criterio de aceptación.

c) La rigidez de ciclo para la distorsión de 0.006 para piezas macizas no deberá de ser menor de 0.1 veces la rigidez de ciclo calculada a partir del primer ciclo aplicado al experimento. En el apartado 5.2.3 se presenta la degradación de rigidez en función de la distorsión aplicada.

**Tabla 5.7. Criterio A.9.3. Degradación de rigidez**

MURO	$K/K_{\text{inicial}}$	Criterio
MCC-3	0.11	OK
MCC-4	0.12	OK
<b>MUROS DE MAMPOSTERIA COMBINADA MORTERO TIPO I (CAP. III)</b>		
MCC-1	0.08	OK
MCC-2	0.11	OK

## 5.6 COMPARACIÓN CON RESULTADOS DE MUROS CONSTRUIDOS CON MORTERO TIPO I (Descritos en el capítulo III)

En el capítulo tres se presentó un resumen de las primeras pruebas realizadas a la mampostería combinada. En dicha investigación se utilizó un mortero tipo I en la elaboración de los muros, se construyeron dos muros de mampostería combinada nombrados MCC-1 y MCC-2 y se presentaron los resultados obtenidos.

En este apartado se realizan las comparaciones de los muros MCC-1, MCC-2 con los muros MCC-3 y MCC-4. La diferencia principal en la elaboración de los primeros dos muros y los últimos dos, es el mortero utilizado, ya que en los dos primeros se utilizó un mortero tipo I de las características recomendadas en las NTCM-2004 y en los últimos dos muros se utilizó un mortero con los proporcionamientos más frecuentemente utilizados en la autoconstrucción.

En la tabla 5.8 se muestran las resistencias de diseño obtenidas del ensayo de los cubos de mortero utilizado en la elaboración de los muros.

**Tabla 5.8. Resistencias de diseño del mortero utilizados en la elaboración de los muros**

Muro	Coefficiente de variación experimental	$f_j^*$ kg/cm <sup>2</sup>
MCC-1	0.03	205.7
MCC-2	0.11	202.0
MCC-3	0.038	44.7
MCC-4	0.157	66.5

Como se observa en la tabla anterior, las resistencias de diseño del mortero utilizado en la elaboración de los primeros muros de mampostería fueron mayores que la resistencia de 125 kg/cm<sup>2</sup> que las NTCM-2004 establecen como mínimas con los proporcionamientos recomendados para un mortero tipo I. Se observa también que las resistencias de los

morteros con los que se construyeron los últimos muros son muy bajas; sin embargo, están por arriba de los  $40 \text{ kg/cm}^2$  que establecen las NTCM-2004 para un mortero tipo III.

Las combinaciones de los muros ensayados se presentan en la figura 5.31. Las dimensiones de los 4 muros fueron las mismas,  $2.3 \text{ m} \times 2.3 \text{ m}$  y las cargas verticales aplicadas fueron similares, del orden de  $0.6 \text{ kg/cm}^2$ .

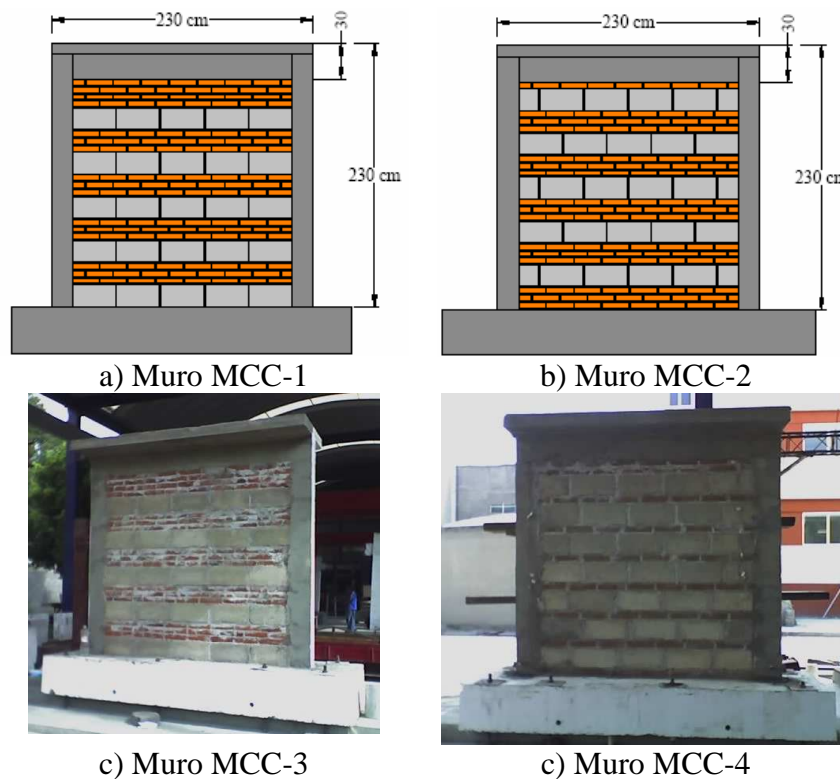


Figura 5.31. Combinación de muros ensayados.

El muro MCC-3 tuvo en esencia, las mismas cantidades de hiladas de bloques y de tabiques que los muros MCC-1 y MCC-2. El muro MCC-4 era el que tenía una mayor cantidad de bloques; por lo tanto, se esperaba una menor resistencia de acuerdo a los resultados de las propiedades de los materiales descritos en el capítulo 2, ya que los bloques tienen muy baja resistencia.

### **5.6.1 Comportamiento histerético**

Las curvas de histéresis obtenidas de los ensayos de los muros se presentan en la figura 5.32.

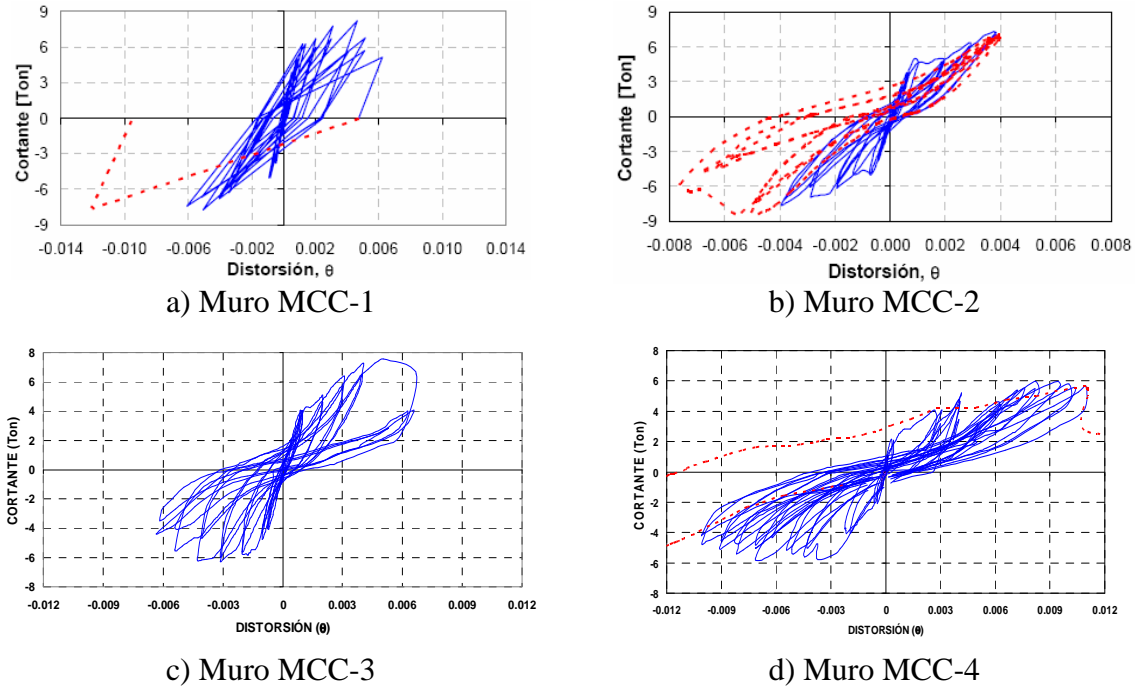


Figura 5.32. Curvas de histéresis de los muros reportados en el capítulo 3 y los ensayados en esta investigación.

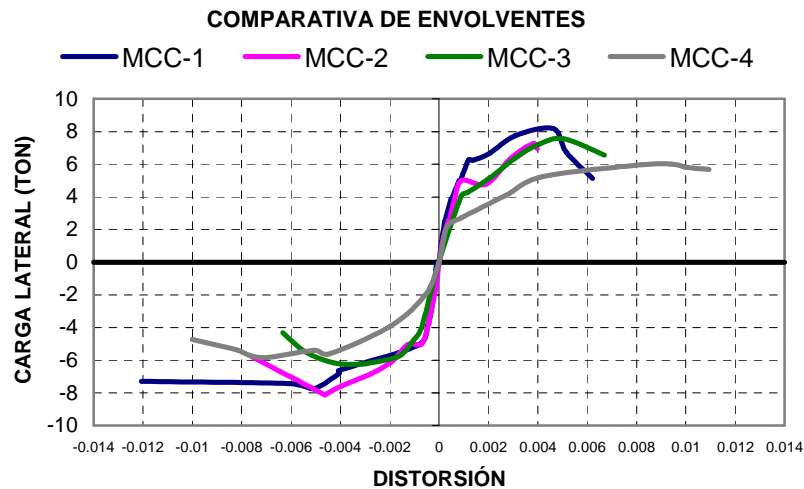


Figura 5.33. Gráfica comparativa de envoltentes

Una observación importante en cuanto al arreglo de los muros, es que el muro MCC-1 y MCC-3 tenían exactamente el mismo arreglo de piezas, la única diferencia era el tipo de mortero usado en su construcción, por una parte el muro MCC-1 fue elaborado con un mortero Tipo I y en la construcción del muro MCC-3 se utilizó un mortero comúnmente utilizado en la autoconstrucción, con la característica principal de poseer cal en abundancia.

De las curvas de histéresis se aprecia que los muros MCC-1 y MCC-3 tuvieron casi la misma resistencia al empuje (muro MCC-1 7.7 ton, muro MCC-3 7.56 ton) y que en ambos casos sólo se logró llevar a los muros hasta una distorsión de 0.06%, después de esta distorsión los muros presentaban inestabilidad; sin embargo, la carga de agrietamiento fue mayor para el primer muro que para el MCC-3.

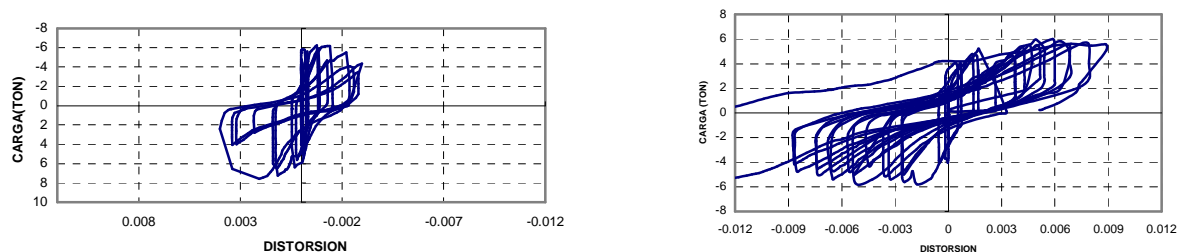
Observando la figura 5.33, se puede decir que la combinación de tabiques y bloques de los muros MCC-1 y MCC-3 es adecuada aún con el uso de un mortero con baja resistencia, debido a que su resistencia es muy similar; sin embargo, la rigidez del muro MCC-3, el cual fue elaborado con un mortero típico en la autoconstrucción, es menor.

En general, las resistencias de los muros no fueron tan bajas, en el peor de los casos (muro MCC-4) se tuvo una resistencia de 6 ton en ambos sentidos y en el mejor de los casos (muro MCC-2) 7.7 ton al empuje y 8.4 al jale.

El muro MCC-4, que era el que tenía la mayor cantidad de bloques, fue el que mostró una menor resistencia (6 ton en ambos sentidos). Su resistencia al primer agrietamiento fue tan sólo de 2 ton y como una peculiaridad, fue el que tuvo la mayor capacidad de deformación, se logró llevar hasta una distorsión de 1%.

Se puede decir entonces que al incluir mayor cantidad bloques, se deben esperar menores resistencias y con mayor razón si el mortero que se usa es pobre en cemento, en general de baja calidad.

Para revisar el comportamiento de las mediciones de desplazamientos realizados con el micrómetro en la parte superior del muro, se obtuvo el desplazamiento con los micrómetros colocados en la parte exterior del muro, encontrando las siguientes graficas.



a) Muro MCC-3

b) Muro MCC-4

Figura 5.34. Curvas esfuerzo deformación con instrumentación externa.

Las gráficas anteriores fueron realizadas para comparar los desplazamientos obtenidos en con el micrómetro de la parte superior del muro y los desplazamientos obtenidos con las deformaciones en los aparatos de medición externos.

Es claro, sobretodo en el muro MCC-4 que los desplazamientos obtenidos de las dos formas son muy similares, además que los micrómetros colocados en las paredes del muro registraron la abertura de las grietas, por eso se observa un corrimiento de las envolventes



en la escala vertical. Las caídas de rigidez en cada ciclo corresponden a los mismos puntos, por lo que se toman como validos las gráficas obtenidas con el micrómetro en la parte superior de los muros.

### 5.6.2 Patrones de agrietamiento

En general, el agrietamiento de los muros fue muy similar, se caracterizaba básicamente por la aparición de grietas en sus diagonales que atravesaban las piezas, hasta llegar a penetrar los castillos lo que significaba una pérdida importante de rigidez. A media altura y en la zona central del muro las grietas diagonales se intersecan con planos horizontales donde esencialmente las juntas comienzan a deslizar a distorsiones mayores de 0.3%, y que son las responsables de los estrechamientos de los lazos de histéresis, y son más marcados o importantes para los muros MCC-3 y MCC-4, donde se unieron con morteros de autoconstrucción. También se observó aplastamiento de los bloques debido a su baja resistencia.

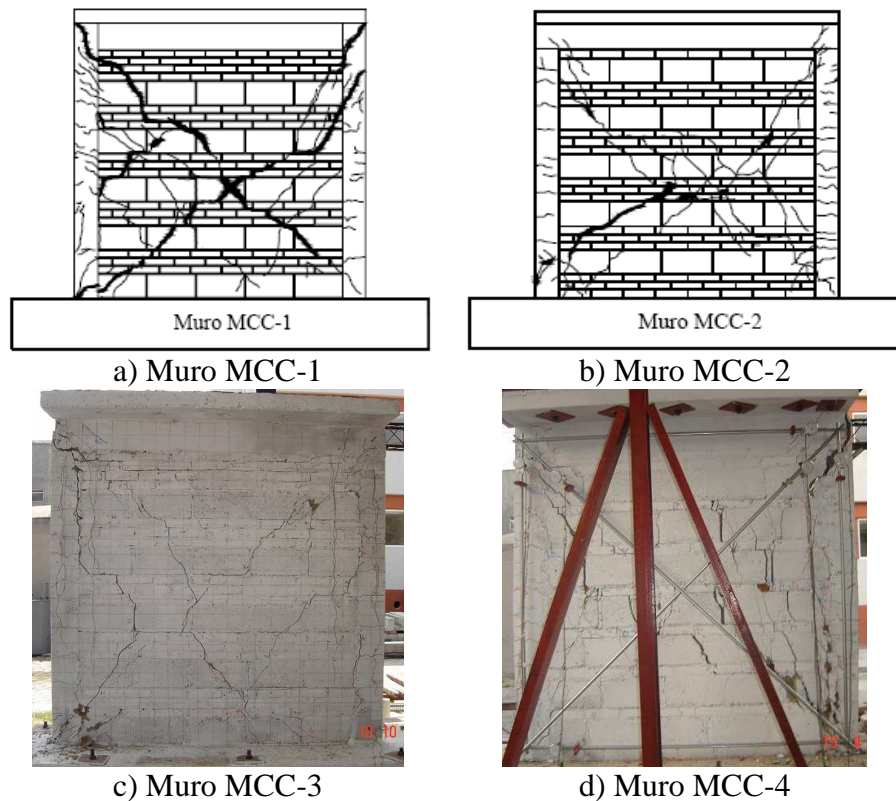


Figura 5.35. Estado final de los muros

Como se observa, todos los muros poseen pequeñas grietas a flexión en los castillos, que en todos los casos aparecieron al inicio del ensaye. En los cuatro muros ensayados se observó aplastamiento de los bloques debido a su baja resistencia a compresión. El debilitamiento y la inestabilidad de los muros se debieron principalmente a la penetración de grietas en los castillos.

En todos los casos las dalas no sufrieron problemas de agrietamiento en su parte central. En general, los patrones de agrietamiento no fueron diferentes de los esperados para muros de mampostería.



## 5.7 COMPORTAMIENTO DEL ACERO DE REFUERZO

Con la finalidad de conocer las deformaciones y, por lo tanto, los esfuerzos a las que se ve sometido el acero de refuerzo, se colocaron deformímetros eléctricos (strain gauges) en los extremos de los castillos y en los extremos de las dala, como se explicó en el capítulo 5.

En las figuras 5.36 a 5.41 se presentan las gráficas esfuerzo versus distorsión. Con línea punteada se muestra el esfuerzo de fluencia de las varillas, para las cuales se consideró  $f_y=4200 \text{ kg/cm}^2$  y un módulo de elasticidad de  $E=2.04 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ . Se optó por considerar los esfuerzos nominales, ya que no se realizaron pruebas a las varillas utilizadas.

Las varillas que tuvieron mayores deformaciones fueron las varillas longitudinales de los castillos, justamente donde las grietas diagonales penetraron. Bajo distorsiones pequeñas los deformímetros leían adecuadamente; sin embargo, al comenzar a ceder el muro y por lo tanto a ser más marcado el agrietamiento, algunos deformímetros se dañaron y se midieron lecturas inadecuadas como es el caso del SG 12 del muro MCC-3.

Del muro MCC-3, dos de las cuatro varillas del castillo derecho alcanzaron la fluencia. Se observa de la figura 5.36, que es el castillo más dañado, en el cual las grietas penetraron en su totalidad. En el muro MCC-4 la mayoría de las varillas instrumentadas con los deformímetros alcanzaron la fluencia, ya que ese muro se logró llevar a deformaciones muy grandes. Todas las varillas instrumentadas de la dala alcanzaron la fluencia a una distorsión de 1%, a diferencia del muro MCC-3 donde ninguna varilla fluyó.

En la tabla 5.9 se presentan las distorsiones a las que fluyeron las varillas instrumentadas con deformímetros de ambos muros.

**Tabla 5.9. Fluencia de las varillas instrumentadas de los muro MCC-3 y MCC-4**

Deformímetro	Varillas que alcanzaron la fluencia		Distorsión a la que se alcanza la fluencia	
	MCC-3	MCC-4	MCC-3	MCC-4
SG1	X	X	0.4%	0.9%
SG2	X	X	0.6%	0.5%
SG3	LI	X	-	0.5%
SG4	-	-	-	-
SG5	-	X	-	1%
SG6	-	X	-	0.5%
SG7	X	LI	0.7%	-
SG8	-	X	-	0.5%
SG9	-	X	-	1%
SG10	-	X	-	1%
SG11	-	X	-	1%
SG12	LI	X	-	1%

LI Lectura de deformímetro inadecuada.

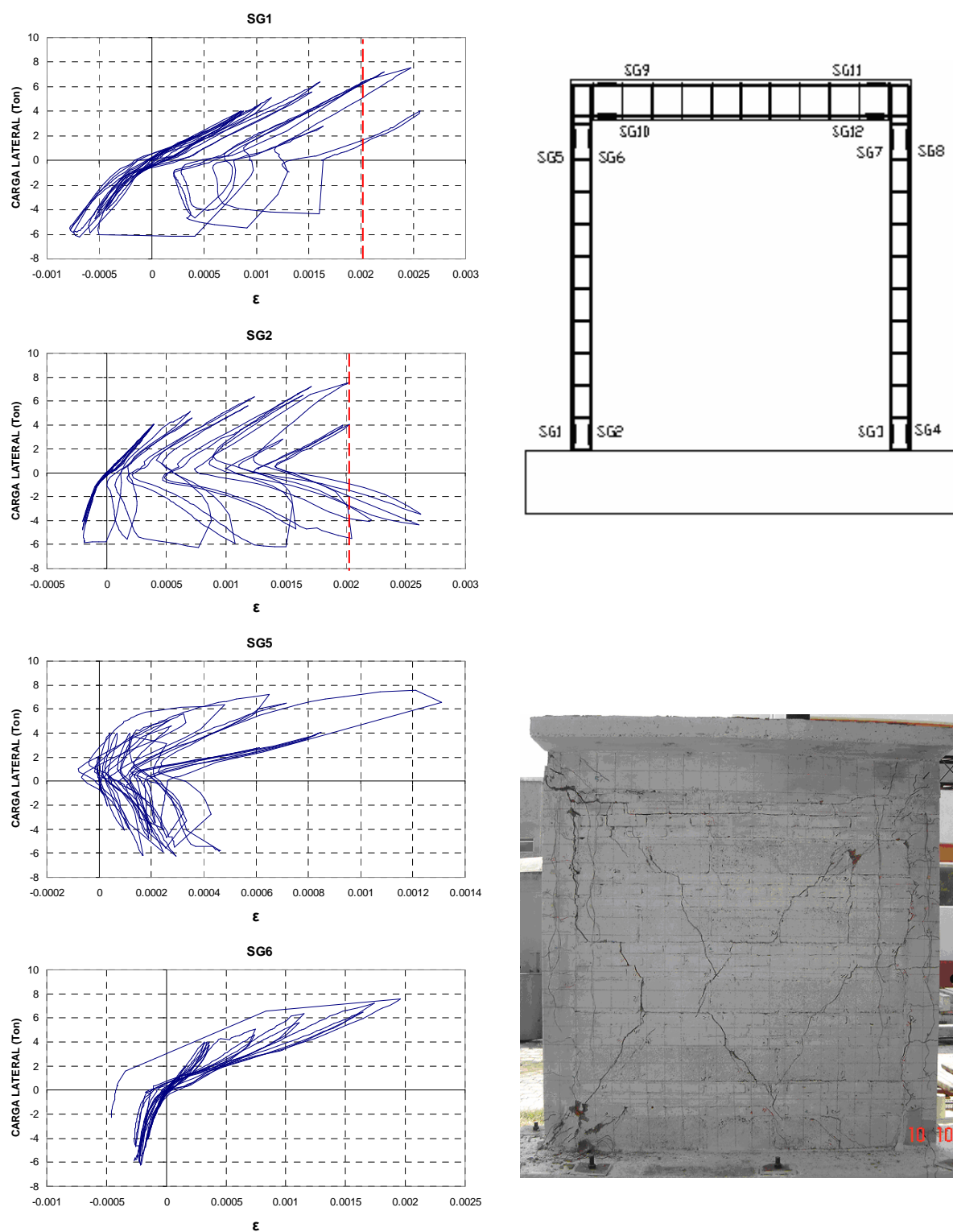
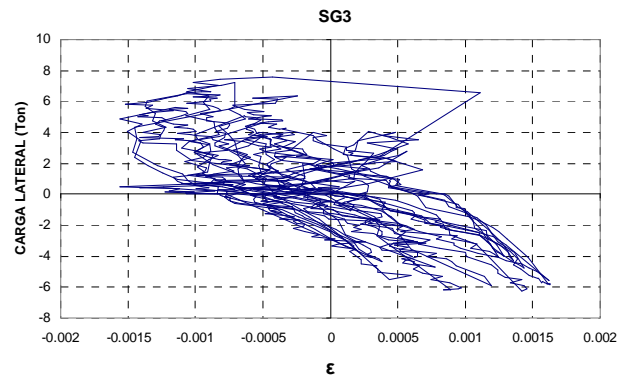


Figura 5.36. Curvas del acero de refuerzo del castillo izquierdo del muro MCC-3

**Capítulo 5. Ensaye experimental ante carga lateral de los muros de mampostería combinada y confinada unidos con mortero utilizado en la autoconstrucción**



(Deformímetro dañado, lecturas inadecuadas)

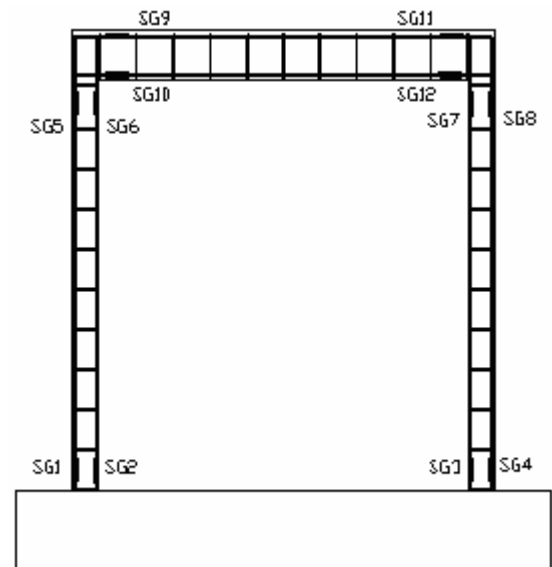
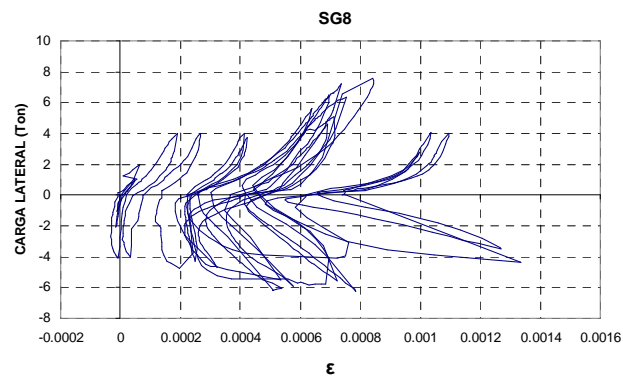
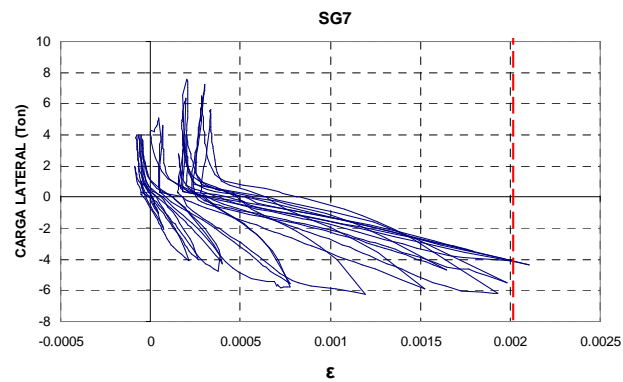
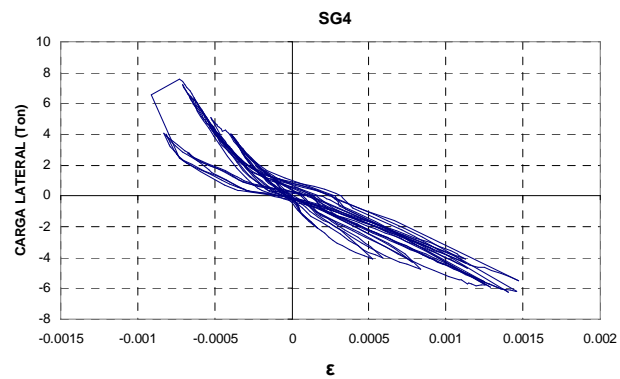


Figura 5.37. Curvas del acero de refuerzo del castillo derecho del muro MCC-3

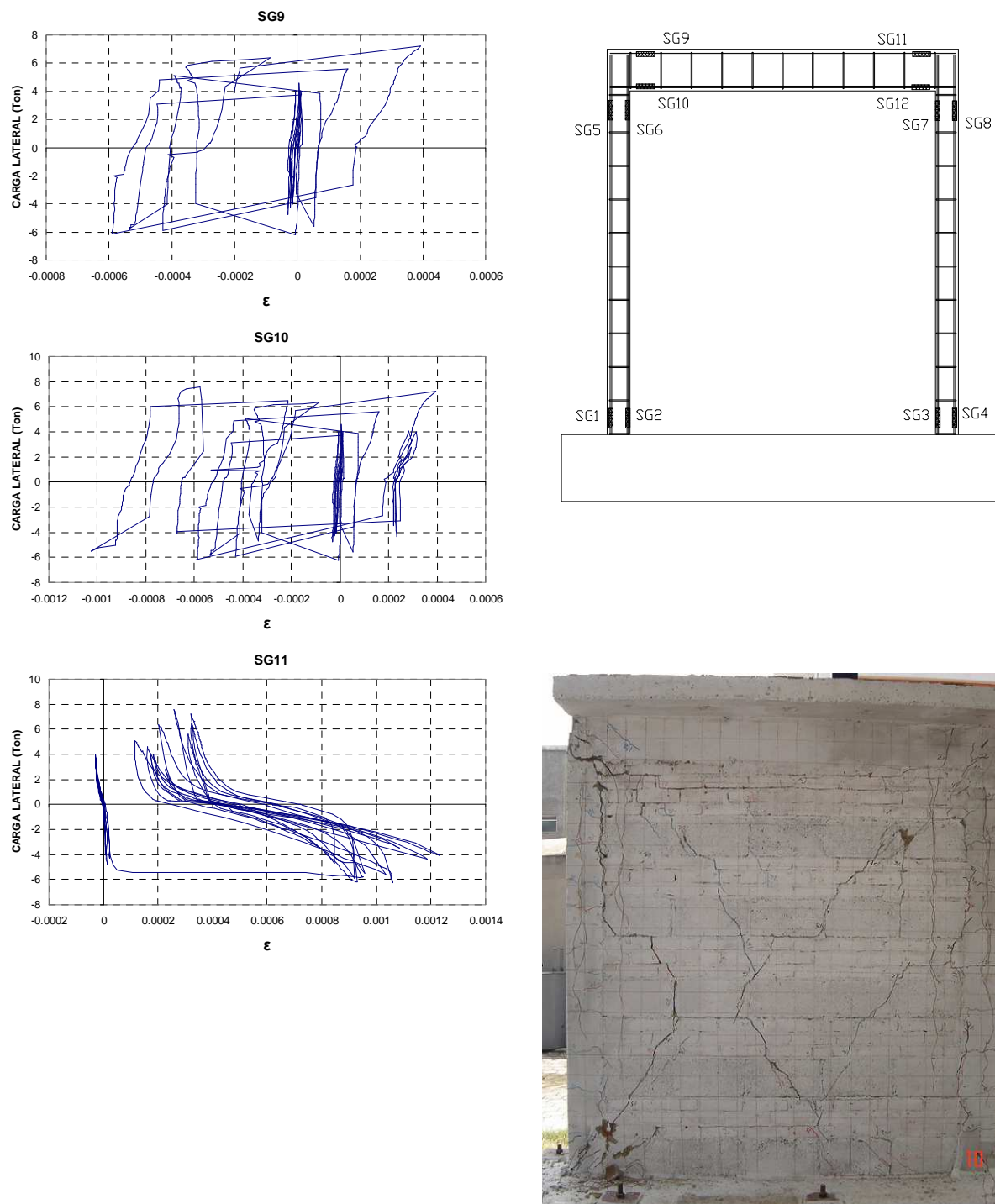


Figura 5.38. Curvas del acero de refuerzo de la dala del muro MCC-3

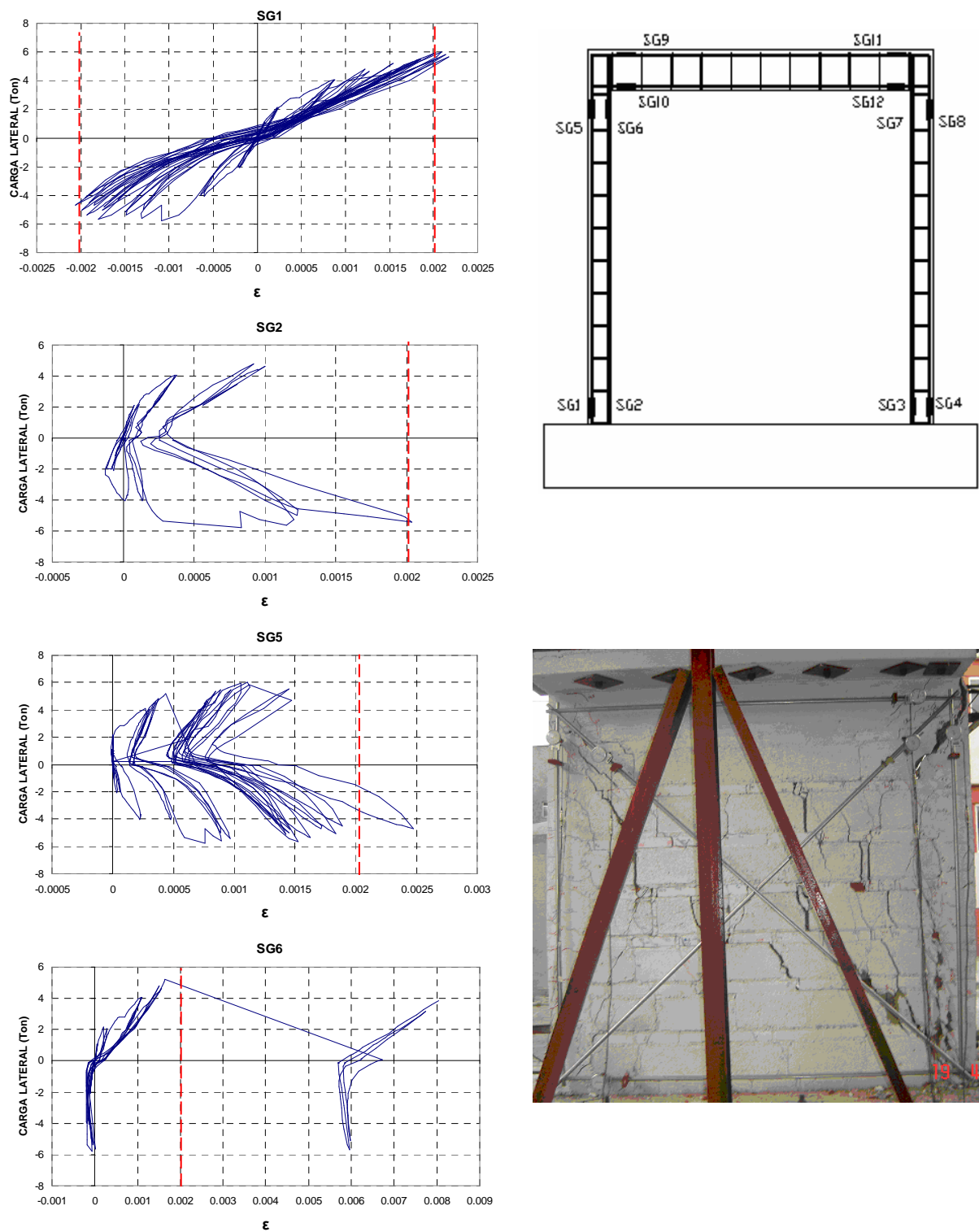
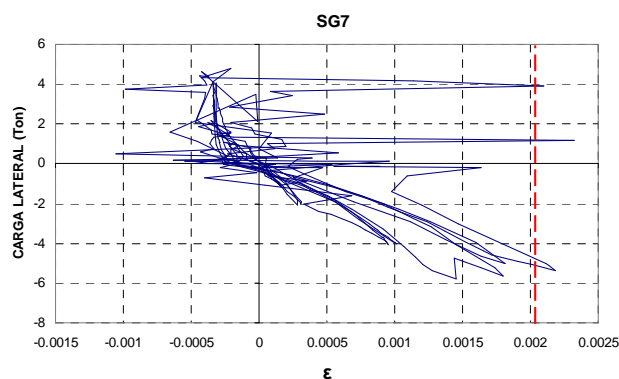
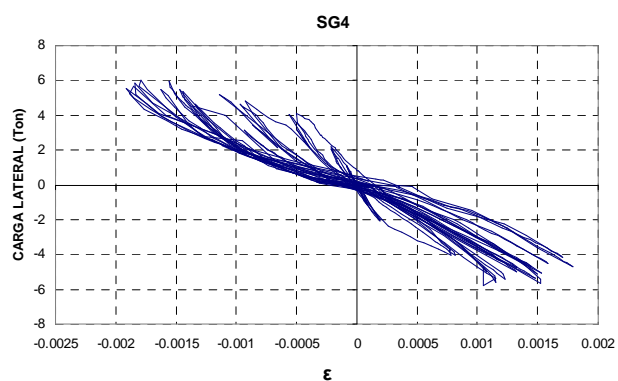
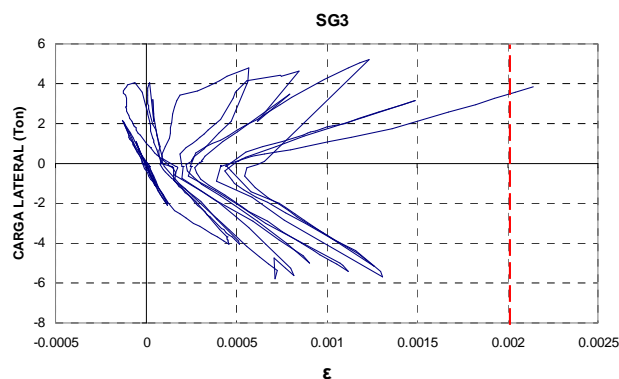


Figura 5.39. Curvas del acero de refuerzo del castillo izquierdo del muro MCC-4





Deformímetro dañado, las grietas en castillos pasan por la ubicación de los strain gauges

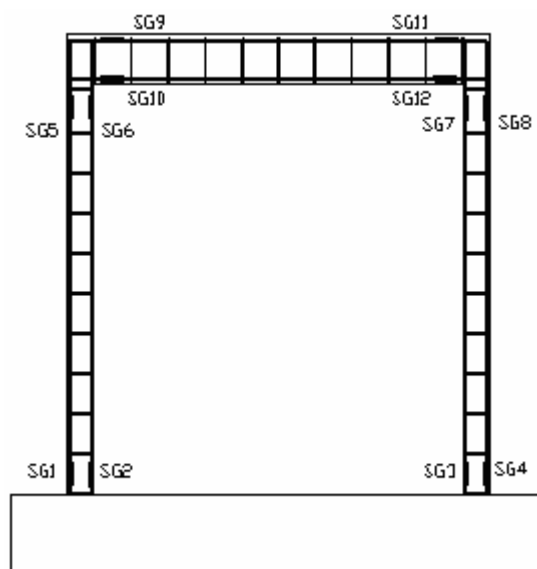
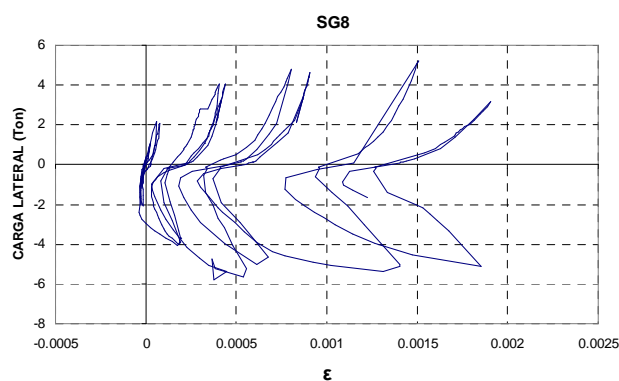


Figura 5.40. Curvas del acero de refuerzo del castillo derecho del muro MCC-4

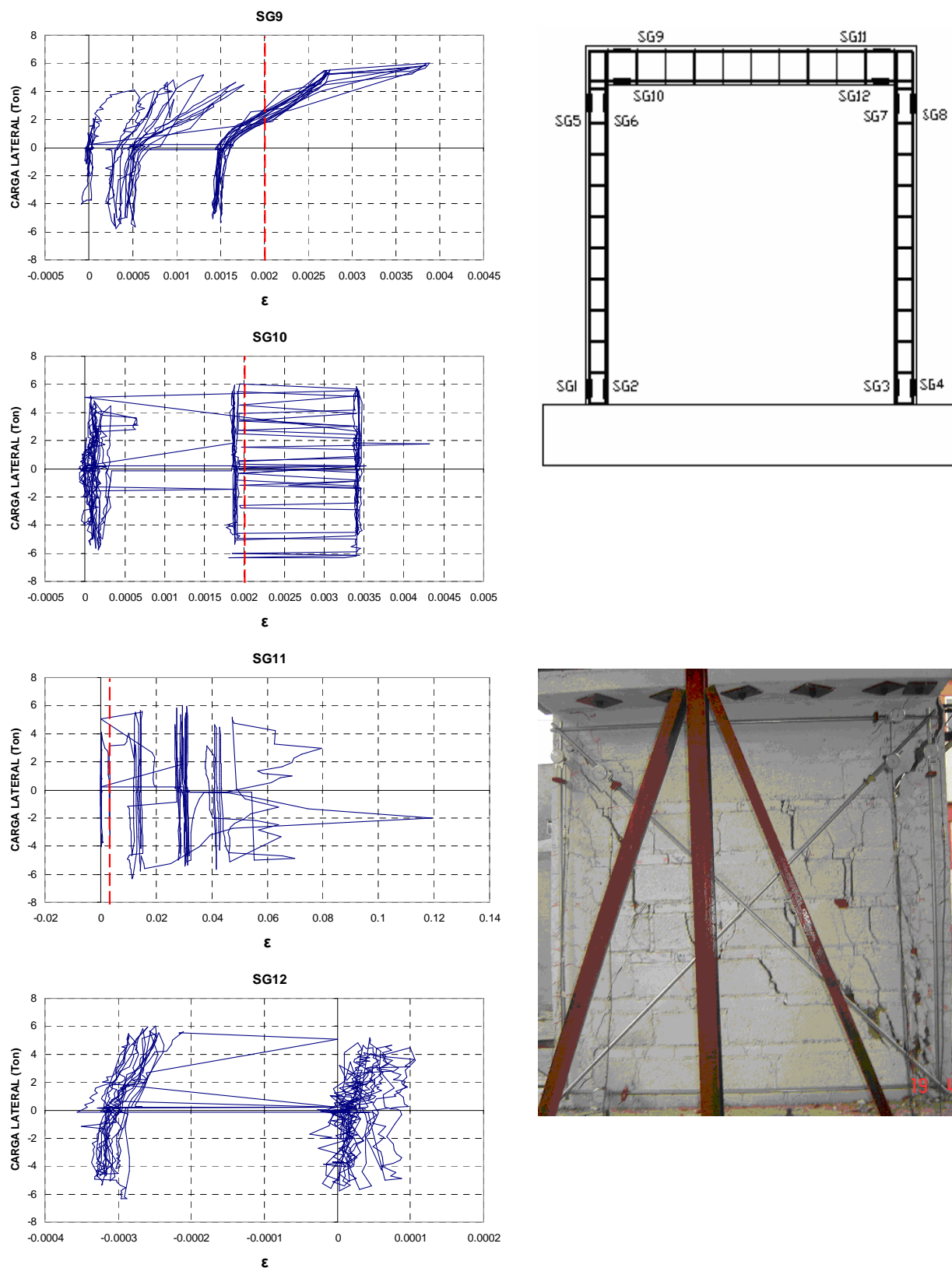


Figura 5.41. Curvas del acero de refuerzo de la dala del muro MCC-4

## 6 MODELADO SIMPLE DE MUROS

Con el objetivo de dar una mayor resistencia y rigidez a las estructuras, en numerosas ocasiones se recurre al uso de contravientos, de muros de concreto o muros de mampostería confinados por un marcos de concreto (castillos y dalas), ya que frecuentemente los marcos no son capaces de aportar la rigidez necesaria a la estructura.

Para simplificar el análisis se han desarrollado diversas técnicas para modelar muros. Algunos de los métodos de modelado son el de la columna ancha equivalente presentados por Bazán y Meli (1998), métodos simples presentados por Schneider y Dickey (1987), el método de la diagonal equivalente, entre otros. En este apartado se presentan las evaluaciones del modelo de la columna ancha y el de la diagonal equivalente para los muros ensayados, tomando en cuenta los datos obtenidos en el ensaye de pilas y muretes.

### 6.1 MÉTODO DE LA COLUMNA ANCHA EQUIVALENTE (MARCO EQUIVALENTE)

Bazán y Meli (2000) presentaron este método basado en estudios realizados a muros en voladizo, donde el desplazamiento lateral en la parte superior del muro es calculado con la siguiente ecuación:

$$\delta = \frac{Ph^3}{3EI} + \frac{Ph}{G\Omega} \quad (6.1)$$

donde:

$h$  = altura del muro

$I$  = momento de inercia

$\Omega$  = área efectiva de cortante de su sección transversal

$E$  = módulo de elasticidad

$G$  = módulo de rigidez a corte

Esta ecuación fue obtenida a partir de la teoría de vigas de Bernoulli-Euler para un material elástico lineal, homogéneo e isotrópico (Tena, 2005).

Bazán y Meli estudiaron diversos muros con diferentes relaciones de aspecto y presentaron una comparación de los desplazamientos obtenidos con el método de elementos finitos, (que se puede considerar como exacto, para el caso elástico lineal) y los desplazamientos obtenidos con la ecuación anterior, encontrando diferencias menores al 4%. Por lo que esta ecuación brinda una muy buena estimación de los desplazamientos.

El término de columna ancha se refiere a que se toman en cuenta las deformaciones debidas al corte y a la flexión generadas por las fuerzas externas, a diferencia de las columnas comunes donde sólo son importantes las deformaciones a flexión.

En las normas NTCM-2004 se permite el modelo de columna ancha para mampostería confinada o reforzada interiormente, considerando la inercia y el área iguales a las del muro



o segmento real. En el análisis que permiten, se debe usar el módulo de elasticidad y de cortante de la mampostería  $E_m$  y  $G_m$ .

Los muros de mampostería confinada son tratados como sistemas de marcos de concreto con muros y para poderlos modelar bajo el método de columna ancha, se deben de definir propiedades equivalentes, la inercia  $I_{eq}$  depende principalmente de la rigidez axial de los castillos y se deberá utilizar un área de corte reducida, que permita modelar la separación del muro y el marco ( $A_{ceq}$ ), tales propiedades pueden determinarse con las siguientes ecuaciones:

$$I_{eq} = A_c \frac{b^2}{2} \quad (6.2)$$

$$A_{ceq} = (0.37 - 0.12\zeta + 0.023\lambda)(A_m + 2 \cdot A_c) \quad (6.3)$$

$$\zeta = \frac{b}{h} \quad (6.4)$$

$$\lambda = \frac{E_c \cdot A_c}{G_m \cdot A_m} \quad (6.5)$$

donde

$A_c$  = sección transversal de cada castillo

$A_m$  = área neta de la sección transversal del muro

$E_c$  = módulo de elasticidad de los castillos

$G_m$  = módulo de cortante del muro

Las ecuaciones de la inercia equivalente y del área equivalente son válidas para los siguientes intervalos de relación de aspecto  $\zeta$  y para el intervalo de rigidez relativa axial de los castillos respecto al muro  $\lambda$ .

$$0.75 \leq \zeta \leq 2.5$$

$$0.9 \leq \lambda \leq 11$$

Basados en lo anterior, y con las propiedades de la mampostería descritas en esta investigación, obtenemos los desplazamientos de los muros de acuerdo a la carga máxima obtenida del empuje del muro en los ensayos.

A continuación se presenta el modelado de los muros ensayados.

Para ambos muros la relación de aspecto es igual a  $\zeta = 0.95$ .

### 6.1.1 Muro MCC-3

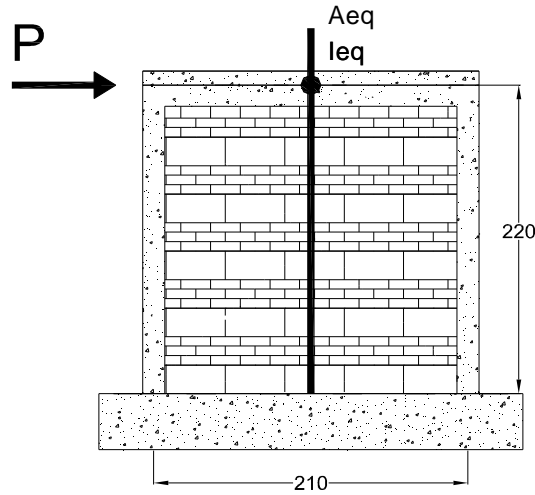


Figura 6.1. Modelado de muro MCC-3 como columna ancha

El área de los castillos es  $A_c = 240 \text{ cm}^2$  y el área transversal total del muro es  $A_m = 2280 \text{ cm}^2$ . Se consideró, a partir de los resultados de pruebas experimentales, que el módulo de elasticidad del concreto de los castillos es  $E_c = 93808.3 \text{ kg/cm}^2$  y que el módulo de rigidez a corte para este tipo de mampostería es  $G_m = 4256.4 \text{ kg/cm}^2$

Por lo tanto:

$$\lambda = \frac{E_c \cdot A_c}{G_m \cdot A_m}; \quad \lambda = 2.31$$

De tal manera que la inercia equivalente y el área equivalente son:

$$I_{eq} = A_c \frac{b^2}{2}; \quad I_{eq} = 5292000 \text{ cm}^4$$

$$A_{ceq} = (0.37 - 0.12\zeta + 0.023\lambda)(A_m + 2 \cdot A_c); \quad A_{ceq} = 853.2 \text{ cm}^2$$

El desplazamiento al aplicar la carga máxima correspondiente al empuje del muro  $P = 6.22$  ton tomando en cuenta las deformaciones por corte de acuerdo a la ecuación 6.1, será:

$$\delta = \frac{Ph^3}{3EI} + \frac{Ph}{GA_{ceq}}$$

Tomando las propiedades equivalentes, con el módulo de elasticidad de esta combinación de mampostería ( $E_m = 16359.6 \text{ kg/cm}^2$ ), se tiene:

$$\delta = 0.63 \text{ cm}$$

La rigidez es:

$$k = \frac{P}{\delta}; \quad k = 9844.72 \text{ kg/cm}$$

La distorsión

$$\theta = \frac{\delta}{h}; \quad \theta = 0.0028 \text{ cm/cm}$$

En la figura 6.3 se grafica la rigidez secante obtenida con la columna ancha equivalente y se compara con la curva experimental para el muro MCC-3, donde se aprecia que la distorsión obtenida corresponde al 0.28%, nivel de distorsión en el cual el muro sufre un moderado agrietamiento. La distorsión obtenida con el modelo de columna ancha corresponde a un nivel de daño como el de la figura 6.3.

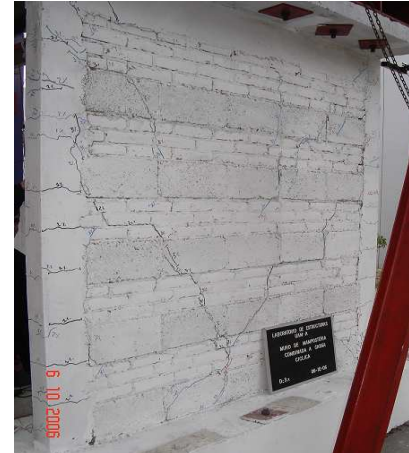
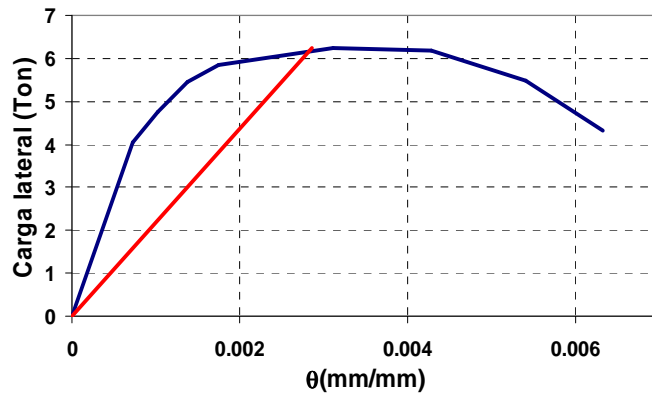


Figura 6.3. Nivel de agrietamiento correspondiente a la distorsión obtenida con modelo de columna ancha.

### 6.1.2 Muro MCC-4

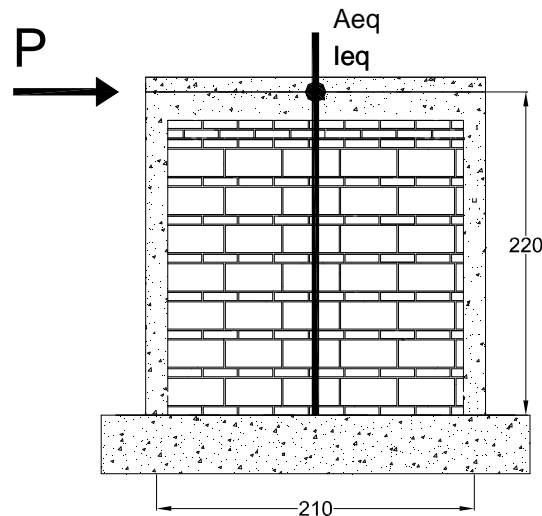


Figura 6.4. Modelado de muro MCC-4 como columna ancha.

Los castillos tenían un área de  $A_c = 240 \text{ cm}^2$  y el área trasversal total del muro de  $A_m = 2280 \text{ cm}^2$ . Se considero a partir de los resultados de pruebas experimentales, que el módulo de

elasticidad del concreto de los castillos es  $E_c=115377.6 \text{ kg/cm}^2$  y que el módulo de rigidez a corte para este tipo de mampostería de  $G_m=3200.1 \text{ kg/cm}^2$ .

Por lo tanto:

$$\lambda = \frac{E_c \cdot A_c}{G_m \cdot A_m}; \quad \lambda = 3.78$$

De tal manera que la inercia equivalente y el área equivalente son:

$$I_{eq} = A_c \frac{b^2}{2}; \quad I_{eq} = 5292000 \text{ cm}^4$$

$$A_{ceq} = (0.37 - 0.12\zeta + 0.023\lambda)(A_m + 2 \cdot A_c); \quad A_{ceq} = 946.51 \text{ cm}^2$$

El desplazamiento al aplicar la carga máxima correspondiente al empuje del muro  $P= 5.85$  ton, tomando en cuenta las deformaciones por corte de acuerdo a la ecuación 6.1 será:

$$\delta = \frac{Ph^3}{3EI} + \frac{Ph}{GA_{ceq}}$$

Tomando las propiedades equivalentes, con el módulo de elasticidad de esta combinación de mampostería ( $E_m=14871.7 \text{ kg/cm}^2$ ) se obtuvo un desplazamiento igual a:

$$\delta = 0.68 \text{ cm}$$

La rigidez es

$$k = \frac{P}{\delta}; \quad k = 8493.8 \text{ kg/cm}$$

La distorsión

$$\theta = \frac{\delta}{h}; \quad \theta = 0.0031 \text{ cm/cm}$$

En la figura 6.6 se aprecia que la rigidez obtenida con el modelo de la columna ancha es inferior a la rigidez en el intervalo elástico del muro, la rigidez corresponde al 0.22% de distorsión. A este nivel de distorsión la condición del muro es la que se aprecia en la figura 6.6.

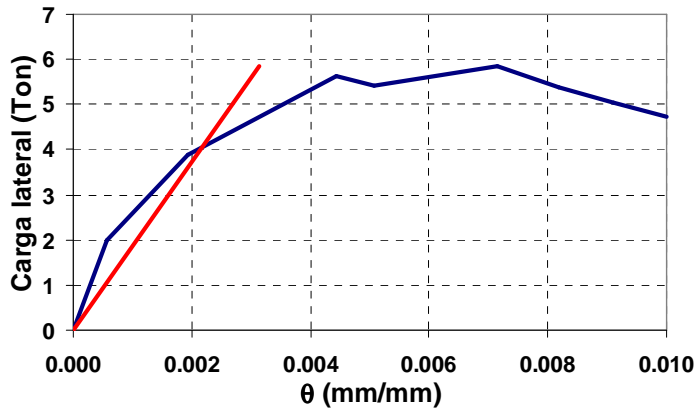


Figura 6.6. Nivel de agrietamiento correspondiente a la distorsión obtenida con modelo de columna ancha.

## 6.2 MODELO DE LA DIAGONAL EQUIVALENTE

Se ha observado que inicialmente el muro y el marco que lo confina (castillos y dala) trabajan en conjunto, como una columna, donde los castillos proporcionan la rigidez a flexión y el muro aporta la resistencia al corte (Bazán y Meli 2004).

Sin embargo, también se ha observado que bastan desplazamientos muy pequeños para que el marco y el muro se separen, si no existe la suficiente adherencia o algún conector entre ellos.

Cuando se separa el muro del marco que lo confina, aparecen esfuerzos a compresión en las esquinas del muro donde se apoya, y en las esquinas que se separan del marco esfuerzos a tensión que generan el agrietamiento de la mampostería (figura 6.7).

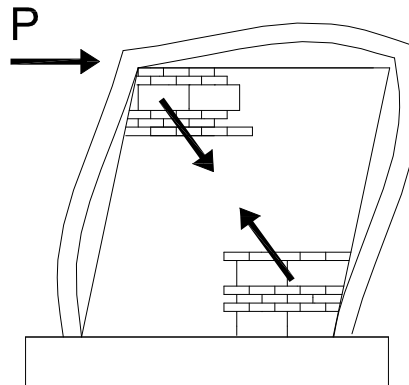


Figura 6.7. Separación de muro y marco y formación de puntales a compresión.

Con la finalidad de conocer la rigidez lateral de muro y conocer los elementos mecánicos que originan las cargas sísmicas en el marco y muro, podemos idealizar el muro como una diagonal equivalente en compresión dentro del marco.

Basados en estudios con modelos de elemento finito, Bazán y Meli propusieron en 1980 que la diagonal equivalente tuviera el mismo espesor del muro, el módulo de elasticidad  $E_m$  del muro y el ancho de la diagonal que proponen esta dado por la siguiente ecuación (Tena 2005):

$$w = (0.35 + 0.022\lambda)h \quad (6.6)$$

donde  $h$  es la altura entre ejes del tablero y  $\lambda$  al igual que en el modelo de columna ancha es un parámetro adimensional basado en las rigideces relativas del muro y del marco, este parámetro esta definido como:

$$\lambda = \frac{E_c \cdot A_c}{G_m \cdot A_m}$$

La fórmula anterior es aplicable en los mismos intervalos de relación de aspecto y de rigideces relativas que el modelo de columna ancha.

$$0.75 \leq \zeta \leq 2.5$$

$$0.9 \leq \lambda \leq 11$$

Con lo anterior, cada muro puede idealizarse como un elemento que trabaja de forma axial cuya formulación de rigidez es la siguiente:

$$k_i = \frac{E_m \cdot A_{eq}}{L_{diag}} \quad (6.7)$$

Con las rigideces de cada elemento del marco (castillos y dala) y con la rigidez del elementó trabajando en la diagonal de manera axial, se ensambla la matriz de rigidez y se resuelve para la obtención de los elementos mecánicos.

Con lo anterior, para cada uno de nuestros muros obtuvimos las propiedades de la diagonal equivalente, le impusimos la fuerza máxima al empuje obtenida de los ensayos experimentales y obtuvimos el desplazamiento por medio del programa SAP.

La relación de aspecto para ambos muros esta dentro del intervalo marcado.

$$\zeta = 0.95$$

En la figuras 6.8 y 6.9 se presentan las idealizaciones de los muros confinados con la diagonal equivalente.

### 6.2.1 Muro MCC-3

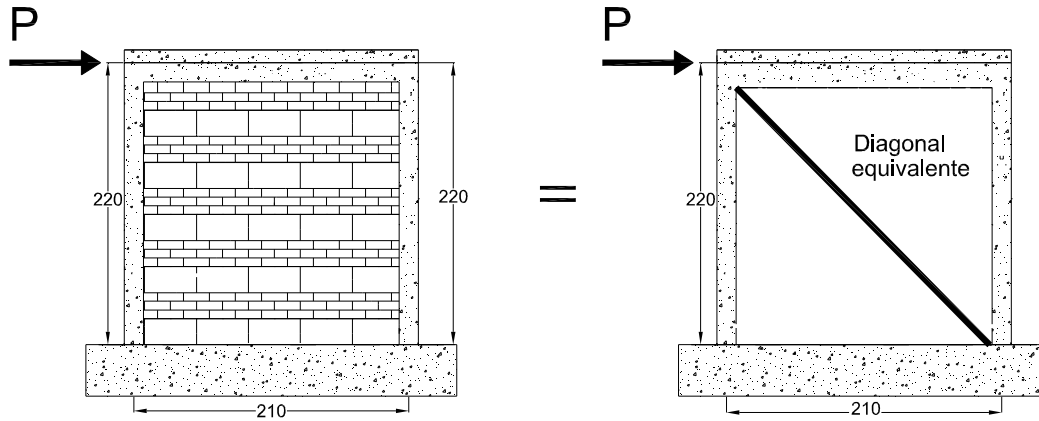


Figura 6.8. Idealización del muro MCC-3 por medio de la diagonal equivalente.

Los castillos tenían un área igual a  $A_c = 240 \text{ cm}^2$ , el área transversal total del muro de  $A_m = 2280 \text{ cm}^2$ , A partir de los resultados de las pruebas experimentales se consideró un módulo de elasticidad del concreto de los castillos de  $E_c = 93808.3 \text{ kg/cm}^2$ , un módulo de rigidez a corte para este tipo de mampostería de  $G_m = 4256.4 \text{ kg/cm}^2$ .

Por lo tanto:

$$\lambda = \frac{E_c \cdot A_c}{G_m \cdot A_m} ; \lambda = 2.31$$

Este parámetro cae dentro del intervalo marcado para las rigideces relativas de los castillos y el muro.

Por lo tanto, el ancho de la diagonal equivalente es:

$$w = (0.35 + 0.022\lambda)h$$

$$w = 88.18 \text{ cm}$$

El área de la diagonal equivalente es:

$$A = w \cdot t ; A = 1058.16 \text{ cm}^2$$

La longitud de la diagonal es:

$$L = \sqrt{220^2 + 210^2} ; L = 304.1 \text{ cm}$$

Por medio del programa SAP se realizó el análisis del marco con la diagonal equivalente, con las propiedades de la mampostería. La carga máxima resistida obtenida del empuje máximo observado en el diagrama de histéresis y la carga vertical distribuida en todo el muro.



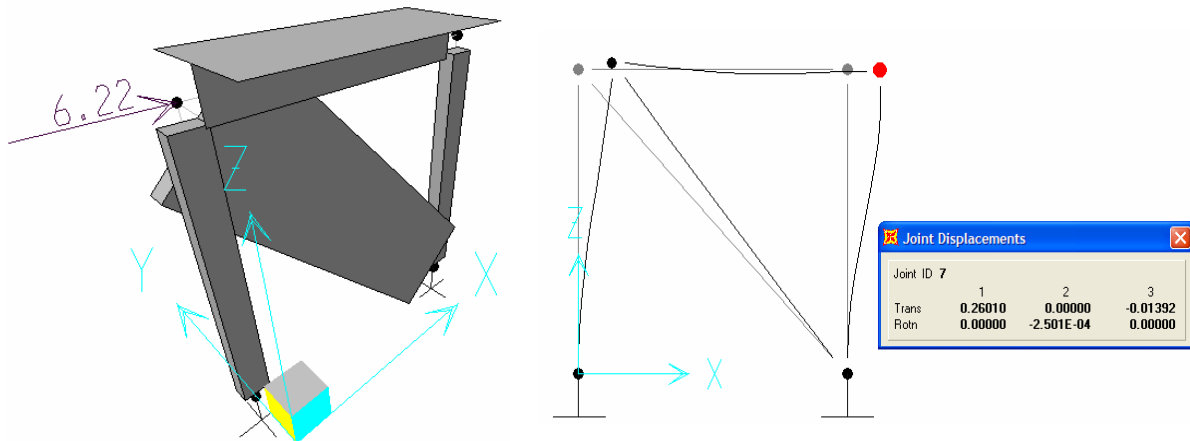


Figura 6.9. Análisis de marco, modelo de diagonal equivalente y desplazamiento máximo.

El análisis nos arroja un desplazamiento en la parte superior del muro de 0.26 cm, una distorsión de 0.0012 cm/cm y una rigidez lateral de  $K = F / \delta$ ,  $K = 23923.1 \text{ kg/cm}$ .

En la figura 6.10, donde se compara la rigidez secante obtenida con la diagonal equivalente con la curva experimental del muro MCC-3. Se aprecia que la rigidez obtenida a partir del modelo de la diagonal equivalente y la rigidez obtenida en la parte elástica del ensayo, las cuales se ajustan casi a la perfección. La distorsión de 0.12% es la asociada a un ligero agrietamiento a flexión en los castillos y grietas moderadas en el muro.

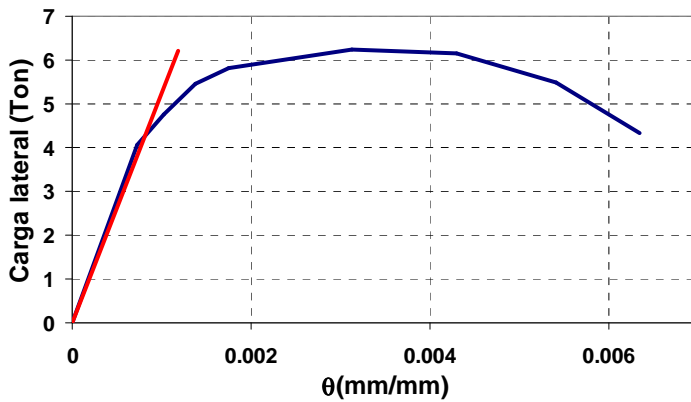


Figura 6.10. Nivel de agrietamiento correspondiente a la distorsión obtenida con modelo de la diagonal equivalente.

### 6.2.2 Muro MCC-4

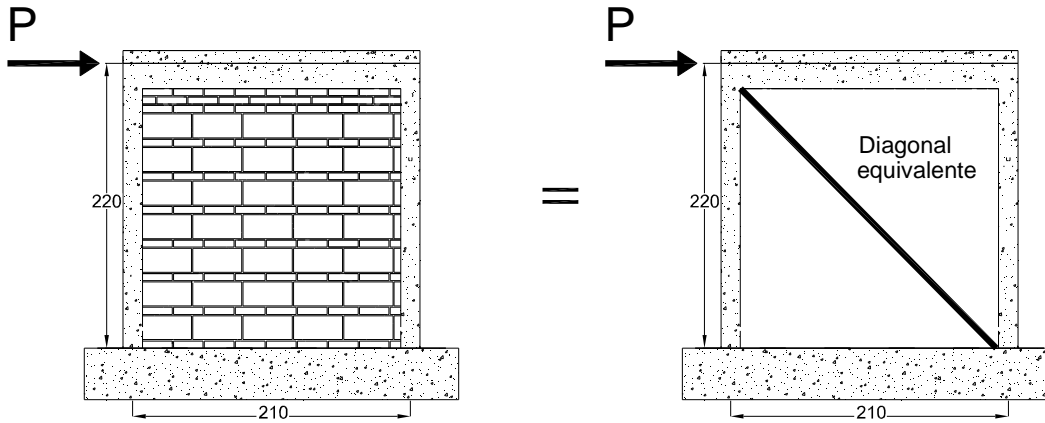


Figura 6.11. Idealización del muro MCC-4 por medio de la diagonal equivalente.

Consideramos un área de castillos igual  $A_c = 240 \text{ cm}^2$ , un módulo de elasticidad del concreto de castillos de  $E_c = 115377.6 \text{ kg/cm}^2$ , un módulo de rigidez a corte para este tipo de mampostería de  $G_m = 3200.1 \text{ kg/cm}^2$  y un área transversal total del muro de  $A_m = 2280 \text{ cm}^2$ .

Por lo tanto:

$$\lambda = \frac{E_c \cdot A_c}{G_m \cdot A_m} ; \lambda = 3.78$$

Este parámetro cae dentro del intervalo marcado para las rigideces relativas de los castillos y el muro.

Por lo tanto, el ancho de la diagonal equivalente es:

$$w = (0.35 + 0.022\lambda)h$$

$$w = 95.3 \text{ cm}$$

El área de la diagonal equivalente es:

$$A = w \cdot t ; A = 1143.5 \text{ cm}^2$$

La longitud de la diagonal es:

$$L = \sqrt{220^2 + 210^2} ; L = 304.1 \text{ cm}$$

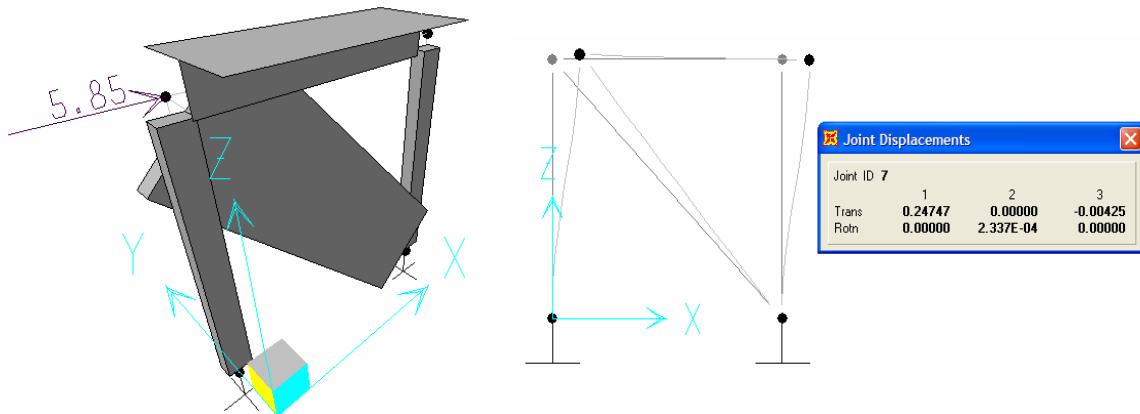


Figura 6.12. Análisis de marco, modelo de diagonal equivalente y desplazamiento máximo.

El análisis nos arroja un desplazamiento en la parte superior del muro de 0.2474 cm, una distorsión de 0.0011 cm/cm y una rigidez lateral de  $K = F / \delta$ ,  $K = 23645.9 \text{ g/cm}$ .

En la figura 6.13 se aprecia la que la rigidez obtenida con el modelo de la diagonal equivalente es un poco mayor que la obtenida del ensaye del muro, la distorsión de 0.10% está asociada a un daño muy ligero para este muro como el mostrado en la figura 6.13.

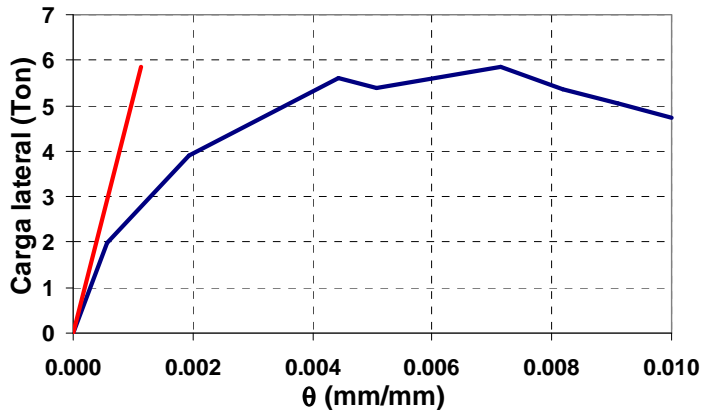


Figura 6.13. Nivel de agrietamiento correspondiente a la distorsión obtenida con modelo de la diagonal equivalente.

## 7 COMPARACIÓN CON MODELO DE FLORES Y ALCOCER

Un modelo analítico debe de representar razonablemente el comportamiento real del elemento que se esta estudiando. En este caso debe representar el comportamiento real de la mampostería, debe de reflejar su fragilidad, su poca capacidad de deformación y debe de tomar en cuenta la resistencia de los materiales que se emplearon en su elaboración. Cuanto más complejo sea un modelo analítico mayor será su aproximación a un modelo real (Flores y Alcocer 2001).

Los modelos analíticos tienen muchas ventajas, una de las más importantes es que se pueden evitar ensayos experimentales, los cuales resultan costosos, y en ocasiones difíciles de llevar a cabo por las complicaciones de tiempo o por la escasa capacidad de un laboratorio. Otra ventaja es que al modelo analítico se le pueden aplicar distintos estados de carga, lo que en un ensaye en un laboratorio sería muy tardado o incluso sería imposible aplicar dichas solicitaciones.

En el 2001 Flores y Alcocer propusieron un modelo trilineal simple que toma en cuenta el comportamiento general de la mampostería confinada, elaborada con tabiques de barro recocidos hechos a mano; sin embargo, en su reporte comentan que se esperaba un comportamiento similar para tabiques y bloques de concreto.

Los muros con los cuales su modelo fue calibrado tenían una altura de 2.4m las relaciones de aspecto fueron de 1 y 1.5 y en todos los casos mantuvieron una carga constante de  $5 \text{ kg/cm}^2$ , carga representativa de un muro de cuatro o cinco niveles.

La envolvente típica de un muro de mampostería la discretizaron en tres puntos, en primer lugar el primer agrietamiento al finalizar la parte elástica en la cual el muro sufre un agrietamiento importante en una de sus diagonales. El segundo punto es aquel en el cual a pesar de que el muro sufre agrietamiento y pérdida de rigidez, incrementa su carga hasta llegar a su resistencia máxima. El tercer punto es aquel en el cual el muro sufre un daño severo y sufre una pérdida de rigidez importante hasta llegar a una distorsión bastante grande, siendo evidente la inestabilidad del muro.

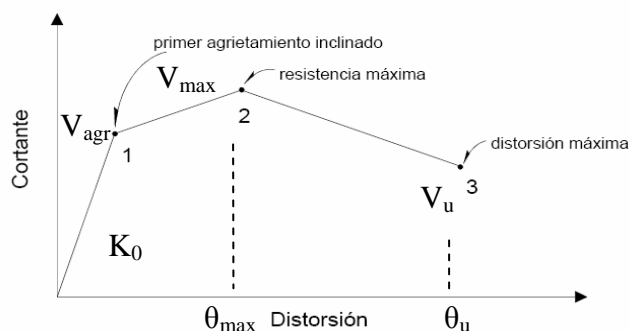


Figura 7.1. Envolvente para el ciclo histerético (Flores y Alcocer 2001)

En las envolventes de los ciclos de histéresis obtenidos en los ensayos realizados en esta investigación, se observaron las mismas características de la curva descrita con anterioridad. Por tal motivo se decidió utilizar el modelo de Flores y Alcocer para realizar una comparación de las curvas obtenidas con su modelo y las curvas obtenidas experimentalmente.

El modelo de Flores y Alcocer depende de las siguientes variables:

$K_0$	Rigidez inicial de la estructura
$V_{agr.}$	Carga correspondiente al agrietamiento de la mampostería
$V_{máx.}$	Carga máxima
$V_u$	Carga última
$H$	Altura del espécimen
$\theta_{vmáx}$	Distorsión asociada a la carga máxima
$\theta_u$	Distorsión asociada a la carga última

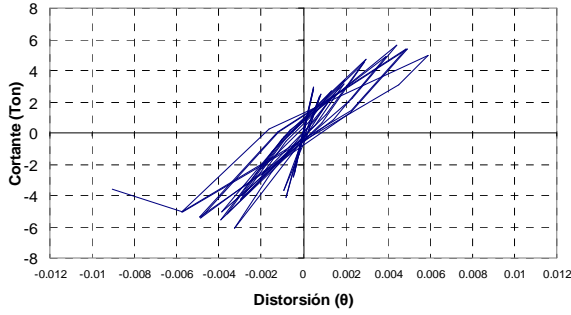
Flores y Alcocer proponen valores para la carga última, para su distorsión asociada y para la distorsión asociada a la carga máxima. El cortante de agrietamiento es el asociado a la resistencia calculada de acuerdo a las NTCM-2004.

Flores propone que la carga última sea  $0.8V_{agr}$  para una distorsión de 0.01 y también propone que la distorsión a la cual se presenta la carga máxima sea de 0.003. En la tabla 7.1 se presentan los valores aplicados al modelo propuesto por Flores y Alcocer, donde representa el cortante al primer agrietamiento y  $V_{máx.}$  el cortante máximo de la envolvente en los ciclos negativos de las curvas de histéresis de los muros ensayados. El modelo de Flores y Alcocer es alimentado con las historias de carga y desplazamiento de los ensayos de los muros.

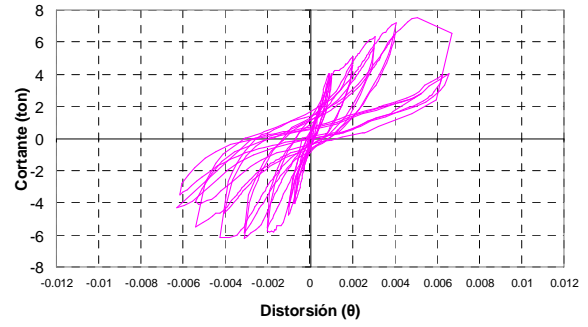
**Tabla 7.1. Datos recomendados por Flores y Alcocer para la obtención de las curvas analíticas.**

	$K_0$ Ton/ cm	$V_{agr}$ Ton	$V_{máx}$ Ton	$V_u$ Ton	$H$ cm	$\theta_{vmáx}$	$\theta_u$
<b>Muro MCC-3</b>	26.3	4.0	6.22	3.20	220	$0.003^2$	$0.01^2$
<b>Muro MCC-4</b>	18	1.98	5.85	1.68	220	$0.003^2$	$0.01^2$

En la figura 7.2 y 7.3, se presentan las gráficas analíticas obtenidas con el modelo de Flores y Alcocer y se comparan con las curvas de histéresis obtenidas experimentalmente para los muros MCC-3 y MCC-4.

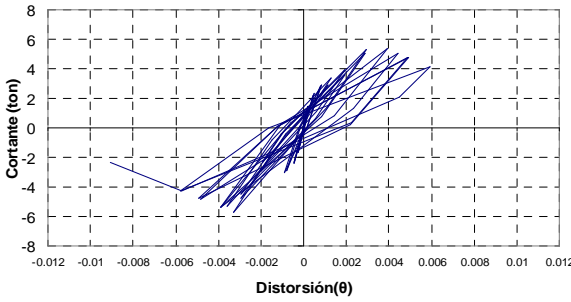


a) Curva analítica

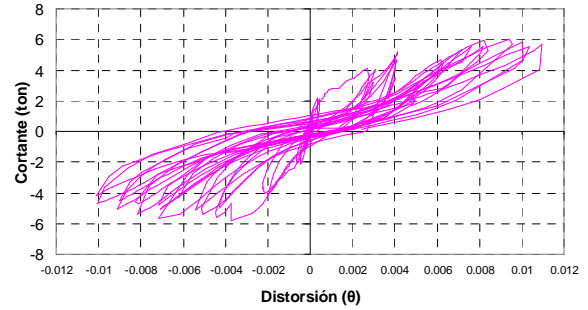


b) Curva experimental

Figura 7.2. Curvas comparativas del muro MCC-3



a) Curva analítica

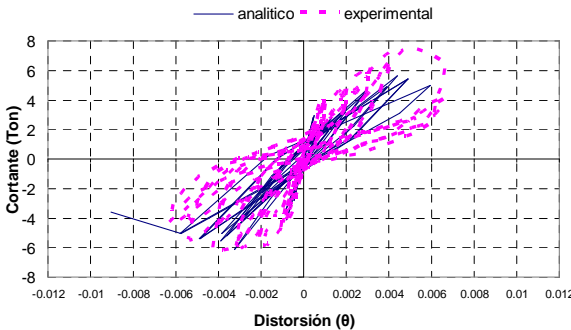


b) Curva experimental

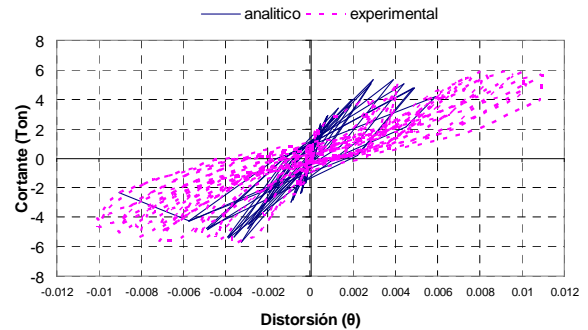
Figura 7.3. Curvas comparativas del muro MCC-4

En las curvas de histéresis anteriores se observa que para ambos muros el modelo de Flores y Alcocer no predice razonablemente la curva experimental, ya que las resistencias están por debajo de las resistencias experimentales y los desplazamientos últimos analíticos, también son inferiores a los desplazamientos experimentales.

En la figura 7.4 y 7.5 se muestran más claramente las comparaciones de las curvas y las envolventes de las mismas para ambos muros.



a) Muro MCC-3



b) Muro MCC-4

Figura 7.4. Curvas comparativas

En las curvas de las envolventes obtenidas analíticamente con el modelo de Flores y Alcocer, se observa que en el caso del muro MCC-3 las predicciones resultan conservadoras, dado que el desplazamiento último que predice el modelo analítico es 50% más grande que el obtenido experimentalmente. En la curva del muro MCC-4 la relación obtenida entre los desplazamientos analítico y experimental es muy similar; sin embargo, el cortante último experimental resultó ser mayor que el obtenido con el modelo analítico.

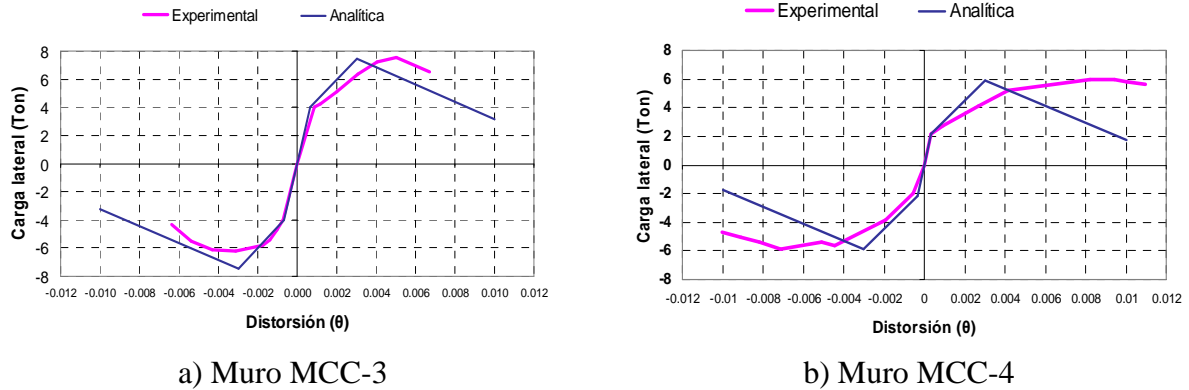


Figura 7.5. Envolventes comparativas

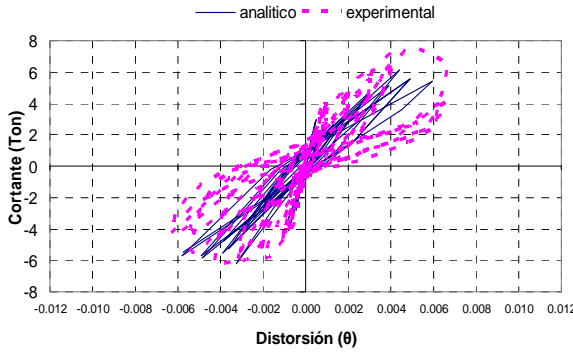
Cabe mencionar que el modelo propuesto por Flores y Alcocer fue calibrado con muros de mampostería elaborada con tabiques de barro recocido y con morteros tipo I, en consecuencia, las diferencias observadas en las curvas obtenidas analíticamente y las experimentales pueden deberse a este motivo.

Para tener una mejor aproximación de acuerdo al modelo de Flores y Alcocer, ingresamos al modelo los parámetros promedio reales obtenidos experimentalmente, tabla 7.2, en el caso del muro MCC-3 una distorsión de 0.6% a diferencia de la recomendada por Flores y Alcocer de 1%. Las curvas de histéresis obtenidas analíticamente así como las envolventes se muestran a continuación.

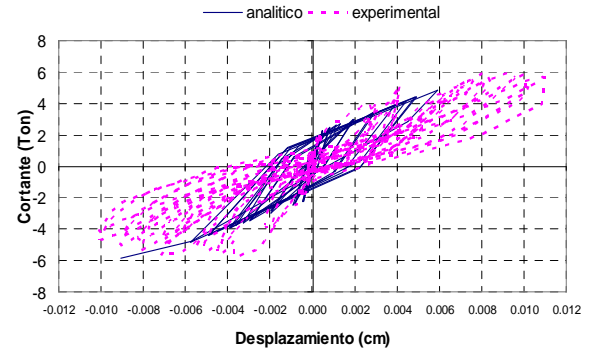
**Tabla 7.2. Datos experimentales de muros ensayados para la aplicación del modelo de Flores y Alcocer.**

	$K_0$ Ton/ cm	$V_{agr}$ Ton	$V_{m\acute{a}x}$ Ton	$V_u$ Ton	$H$ cm	$\theta_{vm\acute{a}x}$	$\theta_u$
<b>Muro MCC-3</b>	26.3	4.0	7.56	4.05	220	0.0048	0.067
<b>Muro MCC-4</b>	18	1.98	5.99	5.5	220	0.0082	0.011



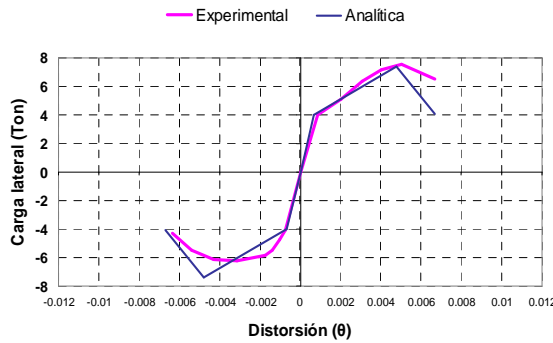


a) Muro MCC-3

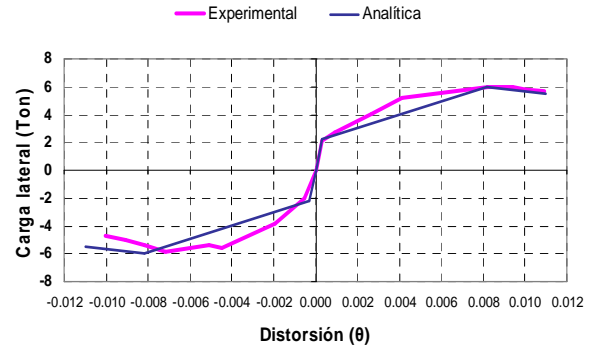


b) Muro MCC-4

Figura 7.6. Curvas de histéresis comparativas



a) Muro MCC-3



b) Muro MCC-4

Figura 7.7. Envoltentes comparativas

De las figura anteriores se observa que en ambos casos las envolventes resultantes se aproximan mucho mejor a las envolventes de los ensayos reales, ya que como se mencionó se ingresaron los datos reales de las curvas obtenidas experimentalmente; sin embargo, en las curvas de histéresis obtenidas no se observa el adelgazamiento central clásico del comportamiento dominado por corte de los muros de mampostería, y esto se debe a la calidad de los morteros, dado que en los ensayos de mampostería combinada y confinada unidos con mortero tipo I y reportados por Juárez (2007) y Tena *et al.* (2007), no se presentó tan marcadamente este fenómeno de deslizamiento de las juntas que causa el estrechamiento de los lazos histeréticos y, por ello, para esos ensayos se obtuvo una mejor aproximación con el modelo de Flores y Alcocer.

## **CONCLUSIONES**

La mayor parte de las estructuras construidas en nuestro país son de mampostería, la mayoría de estas estructuras son destinadas a casa habitación, otras destinadas a espacios para oficinas así como bodegas.

La modalidad de mampostería estudiada en esta investigación (mampostería combinada) inicialmente se observó con mucha frecuencia en estructuras destinadas a la vivienda, sin embargo, se han construido edificios, moteles y naves industriales con esta modalidad. Han sido muchas las regiones donde ha sido observada, en algunos de estos lugares los sismos son frecuentes.

Dada la importancia y la rapidez con que se ha venido extendiendo este tipo de mampostería por diversos lugares de México, las investigaciones que se están realizando son importantes para entender su comportamiento y determinar si estas estructuras tendrán un comportamiento adecuado durante un evento sísmico.

Si bien es cierto que existen muchas investigaciones realizadas en la mampostería, sobre todo en muros construidos con tabique rojo recocido, muros confinados, muros sin confinar, muros con huecos, muros reforzados e incluso muchas investigaciones acerca de la reparación de muros dañados, también es cierto que esta investigación es la segunda realizada a la mampostería combinada después de la investigación de Juárez (2007).

Hasta donde se sabe, en la inmensa mayoría de las investigaciones realizadas a la mampostería en México (por no decir todas), el mortero empleado en la construcción de los especímenes estudiados (pilas, muretes y muros) consistía en un mortero tipo I, que bajo los cuidados que se tienen en un laboratorio, es relativamente fácil obtener las resistencias mínimas establecidas en las NTCM-2004, no así para los morteros utilizados en la autoconstrucción, que difícilmente se tiene una supervisión ingenieril, donde en el mejor de los casos sólo se cuenta con la experiencia de un maestro albañil. Por lo tanto, resultó de gran interés el seguir con el estudio de este tipo de mampostería incluyendo en su construcción un mortero con las características de los morteros empleados en obra, los cuales poseen cal en abundancia y poco cemento, es decir, su resistencia es inferior a la resistencia de un mortero tipo I.

En este estudio se valoraron los mecanismos de resistencia y deformación ante una carga lateral cíclica de dos muros de mampostería combinada unidos con mortero comúnmente utilizado en la autoconstrucción. Los ensayos se llevaron de acuerdo con las recomendaciones del Apéndice normativo A de las NTCM-2004.

Del estudio realizado se desprenden las siguientes conclusiones:

En el presente estudio se determinaron las propiedades de las piezas (tanto de los bloques como de los tabiques) con las que se elaboraron los muros de mampostería combinada, observándose que los bloques utilizados poseen una absorción inicial alta, de tal forma que sería recomendable humedecerlos para evitar que absorban la humedad del mortero

empleado y así evitar la reducción de resistencia del mortero y favorecer una mejor adherencia.

Los tabiques de barro recocido y los bloques de concreto (tabicón) utilizados, poseen una resistencia de diseño a compresión muy baja (tabiques  $49.8 \text{ kg/cm}^2$ , bloques  $22.1 \text{ kg/cm}^2$ ). En las NTCM-2004 se hace referencia a resistencias de diseño de tabiques de barro de más de  $60 \text{ kg/cm}^2$  y a bloques de concreto ligero (tabicón) de más de  $100 \text{ kg/cm}^2$ , lo que hace notar que la calidad de las piezas utilizadas es muy baja. Lo que es peor, es que ese tipo de bloque ligero se utiliza bastante en muchas regiones del país por ser un material de construcción barato, y por sus dimensiones, el avance en la construcción de las viviendas es mucho mayor. Si se piensa en la baja resistencia del bloque, se le suma un mortero de baja resistencia usado en la autoconstrucción y se añaden las deficiencias en el confinamiento de la mampostería debido a la nula supervisión ingenieril, se tienen estructuras de mampostería susceptibles a daños o agrietamiento importantes en un evento sísmico.

El mortero utilizado en esta investigación tuvo los mismos proporcionamientos que los morteros utilizados en la autoconstrucción, las resistencias de diseño obtenidas de los ensayos de cubos de muestras de mortero, arrojaron valores de resistencia a compresión pequeños, en promedio de  $54 \text{ kg/cm}^2$ , valor que se encuentra entre el mortero tipo II ( $70 \text{ kg/cm}^2$ ) y el mortero tipo III ( $40 \text{ kg/cm}^2$ ) que marcan las NTCM-20004. Por lo tanto, el mortero usado comúnmente en la autoconstrucción cubre con el requisito de resistencia mínima que marcan las NTCM-2004.

En esta investigación se realizaron 18 pilas, con dos arreglos distintos; sin embargo, las resistencias obtenidas y el módulo de elasticidad de los dos arreglos fue muy similar. También se ensayaron 18 muretes con dos arreglos distintos, las resistencias promedio fueron similares; sin embargo, el segundo arreglo tuvo muchas mas variaciones lo que castigo un poco las resistencias de diseño y el módulo de rigidez a corte.

La carga vertical aplicada a los muros ensayados en esta tesis, fue relativamente pequeña debido a las limitaciones del dispositivo de prueba. Sería recomendable estudiar más muros de mampostería combinada incrementando la carga vertical (a la correspondiente de un muro de planta baja de un edificio de más de 3 niveles) para valorar aún mejor las diferencias de usar un mortero de autoconstrucción con respecto a un mortero tipo I en cuanto a comportamiento y resistencia.

Las resistencias a corte obtenidas mediante las ecuaciones de las NTCM-2004 resultaron conservadoras para el primer muro, ya que mediante las ecuaciones se predijo una resistencia al primer agrietamiento de 2.9 ton y la resistencia al primer agrietamiento obtenido experimentalmente fue de 4 ton. Para el segundo muro la aproximación fue bastante buena, ya que la resistencia obtenida por las ecuaciones fue de 2.3 ton y la resistencia experimental al primer agrietamiento fue de 2 ton.

De las graficas de histéresis se observó que los muros que poseían mayores cantidades bloques presentan una menor resistencia pero poseen una mayor capacidad de deformación debido a deslizamiento de juntas. Por lo tanto, sería más recomendable utilizar combinaciones de hiladas de tabiques y bloques, en las cuales la predominen los tabiques

de barro, ya que presentaron mayores resistencias y su capacidad de deformación depende menos de la fricción por deslizamiento en las juntas.

El uso de los morteros empleados en la autoconstrucción reduce la resistencia de la mampostería. La inclusión de cal en los morteros incrementa la adherencia entre las piezas; sin embargo, la resistencia del mortero se ve seriamente afectada, sobre todo cuando se utiliza una proporción mayor de cal que de cementante.

De los patrones de agrietamiento de los muros ensayados, por la pérdida de rigidez mostrada y por la inestabilidad presentada después de la penetración de las grietas principales en las esquinas de los castillos, se recomienda la reducción de la separación de los estribos en los extremos de los castillos y de las dadas, para confinar más adecuadamente el concreto, ya que en este caso la separación de los estribos fue de 20 cm.

Por el tipo de material y por la capacidad de deformación mostrada, el muro MCC-4, a pesar de tener menor resistencia, disipó mayor cantidad de energía, debido al importante deslizamiento que experimentó en las juntas.

Las modificaciones que realizó Juárez (2005) a los valores de los límites Kwok y Ang para considerar a la estructura de mampostería combinada reparable o no, fueron adecuados según el comportamiento mostrado de los muros experimentalmente.

A pesar de que los muros MCC-3 y MCC-4 no cumplieran con algunos de los criterios de aceptación de acuerdo con las NTCM-2004 para considerar que se comportaron satisfactoriamente, experimentalmente se observó un buen desempeño, ya que no mostraron en ningún momento una inestabilidad tal que marcara el colapso de los muros.

De acuerdo con las comparaciones con los muros realizados por Juárez (2005) construidos con un mortero Tipo I, el comportamiento de estos muros fue adecuado, las cargas máximas no fueron tan diferentes de las de la investigación de Juárez, su capacidad de deformación fue mayor, sobre todo la del muro MCC-4. Las diferencias más marcadas fueron el primer agrietamiento del muro MCC-4 que fue de tan sólo 2 ton a diferencia de los demás muros que fue de 4 ton y algunos deslizamientos de las piezas en la parte central en los últimos dos muros, que se vio reflejada en el adelgazamiento en la parte central de las curvas de histéresis.

Del modelado de los muros se observó que el método de la columna ancha dio desplazamientos mayores que el método de la diagonal equivalente, por lo tanto las rigideces calculadas de acuerdo con el desplazamiento esperado con el método de la diagonal equivalente fueron mayores.

De las comparaciones de las curvas de histéresis de acuerdo con el modelo de Flores y Alcocer con las curvas experimentales de este estudio, se observó que los valores recomendados de distorsiones para el modelado de los muros, en el caso de esta mampostería, no reflejaron el comportamiento general del muro, quizá por que el modelo fue calibrado con mampostería solamente realizada con tabiques de barro recocido y mortero tipo I y diferentes niveles de carga vertical.

En general, se puede decir que a pesar que esta mampostería posee piezas de baja calidad y un mortero que no es el mejor, el desempeño de este tipo de mampostería fue adecuado para el bajo nivel de carga axial a que fue sujeto. Esto puede ser representativo de lo que puede esperarse en construcciones de un nivel, pero deberá corroborarse con cargas de compresión que representen construcciones de dos y tres niveles (utilizadas actualmente con esta modalidad) y de cinco niveles.

Como recomendaciones en el uso de la mampostería combinada con las piezas que actualmente se emplean se hace hincapié en un mejor confinamiento de los extremos de los castillos y de las dalas, y se recomienda también el uso de combinaciones donde los tabiques de barro predominen a los bloques y, de ser posible, incrementar la resistencia del mortero que se usa empleando una mayor proporción de cemento con respecto a la cal, reduciendo también en proporción volumétrica la cantidad de arena empleada. La modalidad tendrá mejor comportamiento a medida que en México se comercialicen mejores piezas, particularmente los deficientes bloques de concreto que están disponibles en el mercado de la autoconstrucción.

# APÉNDICE A

## CÁLCULO DE LAS PROPIEDADES ÍNDICE DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

En este apartado, se presentan los datos obtenidos en el laboratorio en las pruebas realizadas al concreto utilizado en los castillos, las dalas y las losas, se presentan también las resistencias de los morteros utilizados en la construcción los muros, de las pilas y de los muretes. Se presentan las resistencias a corte, resistencias a compresión, módulos de elasticidad y módulos de rigidez a corte de las pilas y los muretes ensayados.

### A.1 RESISTENCIA DEL CONCRETO

Los cilindros fueron ensayados de acuerdo con la norma MNX-C-ONCEE-2002 en la maquina universal del laboratorio de estructuras de la UAM (figura A.1).



Figura A.1 Ensayo de cilindros de concreto

En las siguientes tablas se resumen las resistencias obtenidas del ensayo de los cilindros de concreto utilizados en la construcción de castillos, dalas, y losas para los muros MCC-3 y MCC-4.

#### ***MURO MCC-3***

##### ***Concreto de castillos***

En la tabla A.1 se presentan las resistencias de los cilindros del concreto utilizado en la elaboración de los castillos para el muro MCC-3.

La dosificación utilizada para la elaboración del concreto para los castillos fue para una resistencia de  $f'_c=150 \text{ kg/cm}^2$ .

Fecha de elaboración de los cilindros: 14/07/06

Fecha de ensaye de los cilindros: 28/11/06

**Tabla A.1. Resistencias de cilindros de concreto(castillos), muro MCC-3**

Cilindro	Área $\text{cm}^2$	Carga kg	$\sigma$ $\text{kg/cm}^2$
1	177.4	21402.4	120.6
2	176.9	25850.5	146.1
3	176.7	25402.3	143.8
4	174.4	24315.5	139.5

Esfuerzo medio:  $137.5 \text{ kg/cm}^2$

Desviación estándar:  $11.6 \text{ kg/cm}^2$

Coefficiente de variación: 0.084

### *Dala y losa*

La dosificación del concreto utilizada para la elaboración de la dala y la losa fue para una resistencia de  $250 \text{ kg/cm}^2$ .

En la tabla A.3 se presentan las resistencias obtenidas en los ensayos de los cilindros de concreto utilizado en la elaboración de la dala y la losa del muro MCC-3.

Fecha de elaboración de los cilindros: 24/07/06

Fecha de ensaye de los cilindros: 28/11/06

**Tabla A.2. Resistencias de cilindros de concreto(dala y losa), muro MCC-3**

Cilindro	Área $\text{cm}^2$	Carga kg	$\sigma$ $\text{kg/cm}^2$
1	178.1	31669.8	177.8
2	177.4	33842.8	190.8
3	177.2	24082.9	135.9
4	178.8	28504.3	159.4

Esfuerzo medio:  $165.9 \text{ kg/cm}^2$

Desviación estándar:  $23.8 \text{ kg/cm}^2$

Coefficiente de variación: 0.143

### MURO MCC-4

En la tabla A.2 se presentan las resistencias de los cilindros del concreto utilizado en la elaboración de los castillos para el muro MCC-4.

#### Concreto de castillos

La dosificación utilizada para la elaboración del concreto para los castillos fue para una resistencia de  $f'_c=150 \text{ kg/cm}^2$ .

Fecha de elaboración de los cilindros: 01/02/07

Fecha de ensaye de los cilindros: 08/06/07

**Tabla A.3. Resistencias de cilindros de concreto(castillos), muro MCC-4**

Cilindro	Área $\text{cm}^2$	Carga kg	$\sigma$ $\text{kg/cm}^2$
1	179.08	32130.3	179.4
2	179.08	43496.8	242.9
3	179.08	39579.5	221.0
4	176.72	33402.1	189.0

Esfuerzo medio: 208.0  $\text{kg/cm}^2$

Desviación estándar: 29.23  $\text{kg/cm}^2$

Coefficiente de variación: 0.14

#### Dala y losa

La dosificación del concreto utilizada para la elaboración de la dala y la losa fue para una resistencia de  $250 \text{ kg/cm}^2$ .

En la tabla A.4 se presentan las resistencias obtenidas en los ensayos de los cilindros de concreto utilizado en la elaboración de la dala y la losa del muro MCC-4.

Fecha de elaboración de los cilindros: 18/02/07

Fecha de ensaye de los cilindros: 24/05/07

**Tabla A.4. Resistencias de cilindros de concreto(dala y losa), muro MCC-4**

Cilindro	Área $\text{cm}^2$	Carga kg	$\sigma$ $\text{kg/cm}^2$
1	178.1	36583.0	205.4
2	177.4	44312.0	249.8
3	177.2	33788.0	190.7
4	178.8	31091.0	173.9



Esfuerzo medio: 204.9 kg/cm<sup>2</sup>  
 Desviación estándar: 32.5 kg/cm<sup>2</sup>  
 Coeficiente de variación: 0.159

## A.2 RESISTENCIA DEL MORTERO UTILIZADO EN LA ELABORACIÓN DE LOS MUROS, LAS PILAS Y LOS MURETES

Como se mencionó, el mortero utilizado en la construcción de los especímenes realizados y estudiados en esta investigación fue un mortero con los mismos proporcionamientos de material usados en la autoconstrucción. La adición de cal en la mezcla hizo que su resistencia fuera baja como se muestran en las siguientes tablas.

De los morteros utilizados en la construcción de los muros, pilas y muretes se tomaron diversas muestras, que consistían en cubos de 5cm de cada lado ensayados de acuerdo con la norma mexicana NMX-C-61-ONNCE (figura A.2).



Figura A.2 Ensayo de cubos de mortero.

### *Mortero Muro MCC-3*

Los resultados del ensayo de las muestras tomadas en la fabricación de estos especímenes se muestran en la tabla A.5.

Fecha de elaboración de los cubos de mortero: 13/07/06

Fecha de ensayo de los cubos de mortero: 10/10/06

**Tabla A.5. Resistencias de cubos de mortero muro MCC-3**

Muestra de Mortero	Área cm <sup>2</sup>	Carga kg	$\sigma$ kg/cm <sup>2</sup>
1	25.0	1800	72
2	25.0	1650	66
3	25.0	1650	66
4	24.5	1650	67.4
5	24.5	1600	65.3
6	24.5	1600	65.3

Esfuerzo medio: 66.99 kg/cm<sup>2</sup>  
 Desviación estándar: 2.56 kg/cm<sup>2</sup>  
 Coeficiente de variación: 0.038  
 Resistencia de diseño ( $f_j^*$ ): 44.66 kg/cm<sup>2</sup>

### ***Mortero Muretes***

Fecha de elaboración de los cubos de mortero: 31/08/06  
 Fecha de ensaye de los cubos de mortero: 27/02/07

**Tabla A.6. Resistencias de cubos de mortero, muretes arreglo 1.**

<b>Muestra de Mortero</b>	<b>Área cm<sup>2</sup></b>	<b>Carga kg</b>	<b><math>\sigma</math> kg/cm<sup>2</sup></b>
1	25.3	750	29.6
2	25.1	790	31.4
3	25.5	1140	44.7
4	24.5	900	36.7
5	24.4	1000	40.9
6	24.4	1025	42.1

Esfuerzo medio: 37.6 kg/cm<sup>2</sup>  
 Desviación estándar: 6.07 kg/cm<sup>2</sup>  
 Coeficiente de variación: 0.16  
 Resistencia de diseño ( $f_j^*$ ): 25.06 kg/cm<sup>2</sup>

### ***Mortero Pilas***

Fecha de elaboración de los cubos de mortero: 29/08/06  
 Fecha de ensaye de los cubos de mortero: 27/02/07

**Tabla A.7. Resistencias de cubos de mortero, pilas arreglo 1.**

<b>Cubo de Mortero</b>	<b>Área cm<sup>2</sup></b>	<b>Carga kg</b>	<b><math>\sigma</math> kg/cm<sup>2</sup></b>
1	24.7	2750	111.1
2	24.7	2700	109.1
3	24.7	2530	102.2
4	24.7	2590	104.9
5	24.8	2700	108.9

Esfuerzo medio: 107.3 kg/cm<sup>2</sup>  
 Desviación estándar: 3.6 kg/cm<sup>2</sup>  
 Coeficiente de variación: 0.033  
 Resistencia de diseño ( $f_j^*$ ): 71.48 kg/cm<sup>2</sup>

### ***Mortero Muro MCC-4 y Pilas***

Tanto el muro MCC-4 y las pilas correspondientes al segundo arreglo se construyeron con el mismo mortero y los resultados de los ensayos de las muestras se presentan en la tabla A.6.

Los resultados del ensaye de las muestras tomadas en la fabricación de estos especímenes se muestran en la tabla A.5.

Fecha de elaboración de los cubos de mortero: 01/02/07

Fecha de ensaye de los cubos de mortero: 08/06/07

**Tabla A.8. Resistencias de cubos de mortero, muro MCC-4.**

Cubo de Mortero	Área cm <sup>2</sup>	Carga kg	$\sigma$ kg/cm <sup>2</sup>
1	25	2143.78	85.75
2	25	2691.24	107.65
3	25	3095.8	123.83
4	24.5	2412.35	98.46
5	25	2556.5	102.26
6	25	1954.69	78.19
7	25	3160.33	126.41
8	25.5	2352.74	92.26
9	25	2326.95	93.08
10	25	2239.08	89.56

Esfuerzo medio: 99.75 kg/cm<sup>2</sup>  
 Desviación estándar: 15.7 kg/cm<sup>2</sup>  
 Coeficiente de variación: 0.157  
 Resistencia de diseño ( $f_j^*$ ): 66.5 kg/cm<sup>2</sup>

### ***Mortero Muretes***

Fecha de elaboración de los cubos de mortero: 15/02/07

Fecha de ensaye de los cubos de mortero: 08/06/07

**Tabla A.9. Resistencias de cubos de mortero, muretes arreglo 2.**

Cubo de Mortero	Área $\text{cm}^2$	Carga kg	$\sigma$ $\text{kg/cm}^2$
1	25	1907.81	76.31
2	25	2006.66	80.27
3	25	1497.04	59.88
4	24.5	2155.74	87.99
5	25	2080.15	83.21
6	24.5	2257.19	92.13
7	25	1511.27	60.45
8	25.5	2066.50	81.04

Esfuerzo medio: 77.66  $\text{kg/cm}^2$

Desviación estándar: 11.82  $\text{kg/cm}^2$

Coefficiente de variación: 0.15

Resistencia de diseño ( $f_j^*$ ): 51.77  $\text{kg/cm}^2$

### A.3 PESO VOLUMÉTRICO DEL MORTERO UTILIZADO

El peso volumétrico del mortero utilizado se obtuvo a partir del peso de los cubos registrado el día de su ensaye entre su volumen. En la tabla A.6 se presentan los pesos volumétricos de las muestras de mortero tomadas durante la construcción del muro MCC-3 junto con las pilas y muretes correspondientes al arreglo 1.

**Tabla A.10. Peso volumétrico de mortero, arreglo 1.**

Cubo de Mortero	Área $\text{cm}^2$	Peso gr	$\gamma$ $\text{Ton/m}^3$
1	25.0	0.186	1.49
2	25.0	0.184	1.47
3	25.0	0.185	1.48
4	24.5	0.187	1.50
5	24.5	0.186	1.49
6	24.5	0.183	1.46
7	25.3	0.187	1.45
8	25.1	0.189	1.49
9	25.5	0.186	1.40
10	24.5	0.187	1.50
11	24.4	0.187	1.51
12	24.4	0.187	1.52
13	24.7	0.187	1.54
14	24.7	0.187	1.54
15	24.7	0.187	1.54

16	24.7	0.186	1.54
17	24.8	0.188	1.54

Peso volumétrico medio: 1.5 ton/m<sup>3</sup>  
 Desviación estándar: 0.038 ton/cm<sup>3</sup>  
 Coeficiente de variación: 0.025

En la tabla A.7 se presentan los pesos volumétricos de las muestras de mortero tomadas durante la construcción del muro MCC-4 junto con las muestras de mortero tomadas durante las pilas y muretes correspondientes al arreglo 2.

**Tabla A.11. Peso volumétrico de mortero, arreglo 1.**

Cubo de Mortero	Área cm <sup>2</sup>	Peso gr	$\gamma$ Ton/m <sup>3</sup>
1	25	0.189	1.51
2	25	0.194	1.56
3	25	0.188	1.51
4	24.5	0.189	1.52
5	25	0.181	1.45
6	25	0.189	1.52
7	25	0.193	1.55
8	25.5	0.191	1.44
9	25	0.186	1.49
10	25	0.192	1.54
11	25	0.19	1.52
12	25	0.194	1.56
13	25	0.186	1.49
14	24.5	0.187	1.59
15	25	0.187	1.50
16	24.5	0.195	1.66
17	25	0.181	1.45
18	25.5	0.190	1.44

Peso volumétrico medio: 1.52 ton/m<sup>3</sup>  
 Desviación estándar: 0.056 ton/m<sup>3</sup>  
 Coeficiente de variación: 0.037

#### A.4 PROPIEDADES DE LAS PIEZAS DE MAMPOSTERÍA

En este apartado se presentan las pruebas realizadas a los tabiques y los bloques utilizados en la construcción de los especímenes estudiados.

## PROPIEDADES DE LAS TABIQUES ROJOS RECOCIDOS

### *Absorción, absorción inicial, coeficiente de saturación y peso volumétrico*

En la tabla A12 se presentan los pesos de los tabiques, después de haberlos secado en un horno, el peso después de colocarlos a un 1/8" en agua durante un minuto, el peso después de su inmersión en agua a temperatura ambiente durante 24 hrs. y por último el peso después de su inmersión en agua hirviendo durante 5 hrs. Con estos datos obtenidos en el laboratorio se calcularon la absorción, la absorción inicial, el coeficiente de saturación y el peso volumétrico de las piezas, como se muestra en la tabla A.13.

Para el cálculo del coeficiente de saturación sólo se realizó esta prueba a cinco piezas de tabique.

**Tabla A.12. Pesos obtenidos en el laboratorio después de cada prueba**

Tabique	Dimensiones cm			Peso seco kg	Peso 1/8" / 1min kg	Peso 24 hrs kg	Peso 5 hrs kg
	t	b	l				
1	5.3	11.7	23.2	2.18	2.27	2.605	2.657
2	5	11.7	23.2	2.22	2.29	2.640	2.689
3	5.7	11.7	23.2	2.22	2.302	2.645	-
4	5.3	11.7	23.3	2.29	2.370	2.696	-
5	5.6	11.7	23.2	2.31	2.383	2.753	-
6	5.4	11.7	23.3	2.21	2.296	2.643	2.69
7	5.3	11.6	23.1	2.406	2.406	2.781	2.814
8	5.3	11.6	23.2	2.277	2.276	2.620	2.657

**Tabla A.13. Propiedades de las piezas.**

Tabique	Área cm <sup>2</sup>	Absorción %	Absorción inicial gr/min	Coeficiente de saturación	Peso volumétrico ton/m <sup>3</sup>
1	271.4	19.37	65.52	0.889	1.516
2	271.4	18.91	54.54	0.895	1.635
3	271.4	18.91	55.26	-	1.438
4	272.6	17.56	54.59	-	1.587
5	271.4	19.03	50.12	-	1.521
6	270.28	19.18	56.28	0.900	1.519
7	267.96	18.81	47.52	0.930	1.648
8	269.12	18.93	53.00	0.9191	1.544

### Resistencia a la compresión de los tabiques

La resistencia a compresión se obtuvo por medio del ensaye de 5 tabiques de barro recocido y los datos se presentan en la tabla A.14

**Tabla A.14. Resistencia a compresión de tabiques de barro recocido.**

Pieza	Área cm <sup>2</sup>	Carga kg	$\sigma$ kg/cm <sup>2</sup>
1	271.44	30082.9	110.8
2	271.44	26356.9	97.10
3	272.61	23892.0	87.64
4	271.44	22639.9	83.41
5	267.96	23568.1	87.95

Esfuerzo medio:	93.4	kg/cm <sup>2</sup>
Desviación estándar:	10.95	kg/cm <sup>2</sup>
Coefficiente de variación:	0.11	
Resistencia de diseño ( $f_p^*$ ):	49.9	kg/cm <sup>2</sup>

### Módulo de ruptura de los tabiques

Esta prueba se realizó para conocer la resistencia a la tensión de los tabiques y se obtuvo por medio del ensaye de 3 tabiques de barro recocido y los datos se presentan en la tabla A.15

**Tabla A.15. Módulo de ruptura.**

Pieza	t cm	b cm	l cm	Carga kg	$f_r$ kg/cm <sup>2</sup>
1	5.7	11.7	23.2	138.56	9.84
2	5.4	11.6	23.3	122.8	9.80
3	5.3	11.6	23.2	123.96	10.27

Módulo de ruptura medio:	9.97	kg/cm <sup>2</sup>
Desviación estándar:	0.26	kg/cm <sup>2</sup>
Coefficiente de variación:	0.02	

## PROPIEDADES DE LOS BLOQUES SÓLIDOS LIGEROS

### Absorción, absorción inicial, coeficiente de saturación y peso volumétrico

En la tabla A.16 se presentan los pesos obtenidos de los bloques, después de haberlos secado en un horno, el peso después de colocarlos a un 1/8" en agua durante un minuto, el peso después de su inmersión en agua durante 24 hrs. y por último el peso después de su inmersión en agua hirviendo durante 5 hrs. Con estos datos obtenidos en el laboratorio se

calcularon la absorción, la absorción inicial el coeficiente de saturación y el peso volumétrico de las piezas, como se muestra en la tabla A17.

Para el cálculo del coeficiente de saturación sólo se realizó esta prueba a tres piezas de bloque.

**Tabla A.16. Pesos obtenidos en el laboratorio después de cada prueba.**

Bloque	Dimensiones cm			Peso seco Kg	Peso 1/8" / 1min kg	Peso 24 hrs kg	Peso 5 hrs kg
	t	b	l				
1	17.6	12	38	8.62	8.802	11.07	11.418
2	17.3	12	38	8.24	8.479	10.60	10.91
3	17.7	12	38	8.57	8.841	11.00	11.187
4	18.0	12	38	8.65	8.839	11.11	-
5	17.8	12	38	8.87	8.993	11.22	-

**Tabla A.17. Propiedades de las piezas.**

Bloque	Área cm <sup>2</sup>	Absorción %	Absorción inicial gr/min	Coeficiente de saturación	Peso volumétrico ton/m <sup>3</sup>
1	456	28.44	77.01	0.8767	1.07
2	456	28.61	98.87	0.8856	1.045
3	456	28.29	111.09	0.9311	1.063
4	456	28.46	78.03	-	1.054
5	456	26.48	49.39	-	1.093

### **Resistencia a la compresión de los bloques**

La resistencia a compresión se obtuvo por medio del ensaye de 3 bloques sólidos ligeros y los datos se presentan en la tabla A.18

**Tabla A.18. Resistencia a compresión de bloques ligeros.**

Pieza	Área cm <sup>2</sup>	Carga kg	$\sigma$ kg/cm <sup>2</sup>
1	456	17637	38.67
2	456	16025.1	35.14
3	456	19195.5	42.09

Esfuerzo medio: 38.6 kg/cm<sup>2</sup>  
 Desviación estándar: 3.476 kg/cm<sup>2</sup>  
 Coeficiente de variación: 0.089  
 Resistencia de diseño ( $f_p^*$ ): 22.08 kg/cm<sup>2</sup>



### Módulo de ruptura de los bloques

Esta prueba se realizó para conocer la resistencia a la tensión de los bloques y se obtuvo por medio del ensaye a flexión de 2 bloques y los datos se presentan en la tabla A.19

**Tabla A.19. Módulo de ruptura.**

Pieza	t cm	b cm	l cm	Carga kg	$f_r$ kg/cm <sup>2</sup>
1	18	12	38	634.15	11.01
2	17.8	12	38	892.96	15.68

Módulo de ruptura medio: 13.34 kg/cm<sup>2</sup>  
 Desviación estándar: 3.3 kg/cm<sup>2</sup>  
 Coeficiente de variación: 0.247

## A.5 RESISTENCIAS, MÓDULOS DE ELASTICIDAD Y MÓDULOS DE RIGIDEZ A CORTE DE PILAS Y MURETES.

### PILAS

Se realizaron 18 pilas con dos combinaciones de bloque y de tabique, como las mostradas en la figura A.3, en la tabla A.20 y A.21 se resumen las resistencias y los módulos de elasticidad obtenidos del ensaye de las pilas con el primer arreglo y de las pilas con el segundo arreglo respectivamente.

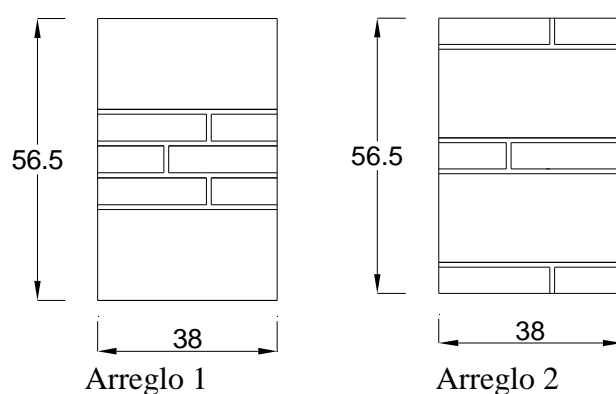


Figura A.3. Combinaciones de pilas ensayadas.

**Tabla A.20. Pilas arreglo-1.**

Pilas	Dimensiones cm			Área cm <sup>2</sup>	Carga kg	$\sigma$ kg/cm <sup>2</sup>	E kg/cm <sup>2</sup>
	t	b	h				
1	12	38	56.7	456	10313.2	22.61	15668.83
2	12	38	56.8	456	14195.6	31.13	53815.05 <sup>1</sup>
3	12	38	56.6	456	9848.4	20.72	14888.99
4	12	38	56.5	456	11509.2	25.23	13593.86
5	12	38	56.5	456	8445.6	18.52	15839.64
6	12	38	56.4	456	10110.8	22.17	17188.75
7	12	38	56.4	456	12401.6	27.19	19249.83
8	12	38	56.5	456	7371	16.16	24338.9
9	12	38	54.4	456	11574	25.38	10108.56

<sup>1</sup>No se tomó en cuenta este valor para el cálculo del módulo de elasticidad

### *Resistencia de las pilas*

Esfuerzo medio:	23.23	kg/cm <sup>2</sup>
Desviación estándar:	4.56	kg/cm <sup>2</sup>
Coefficiente de variación:	0.19	
Resistencia de diseño ( $f_p^*$ ):	16.13	kg/cm <sup>2</sup>

### *Módulo de elasticidad*

Esfuerzo medio:	16359.6	kg/cm <sup>2</sup>
Desviación estándar:	4180.6	kg/cm <sup>2</sup>
Coefficiente de variación:	0.255	

**Tabla A.21. Pilas arreglo-2.**

Pilas	Dimensiones cm			Área cm <sup>2</sup>	Carga kg	$\sigma$ kg/cm <sup>2</sup>	E kg/cm <sup>2</sup>
	t	b	h				
1	12	38	56.7	456	10368	22.73	8979.1
2	12	38	56.8	456	8325	18.25	10209.7
3	12	38	56.6	456	10539	23.11	18411.5
4	12	38	56.5	456	14436	31.65	17289.4
5	12	38	56.5	456	8262	18.12	15654.6
6	12	38	56.4	456	13329	29.23	16442.6
7	12	38	56.4	456	11070	24.27	19769.7
8	12	38	56.5	456	9639	21.13	11187.8
9	12	38	54.4	456	9387	20.58	15900.9

### Resistencia de las pilas

Esfuerzo medio:	23.23	kg/cm <sup>2</sup>
Desviación estándar:	4.61	kg/cm <sup>2</sup>
Coefficiente de variación:	0.19	
Resistencia de diseño ( $f_p^*$ ):	16.065	kg/cm <sup>2</sup>

### Módulo de elasticidad

Esfuerzo medio:	14871.7	ton/m <sup>3</sup>
Desviación estándar:	3816.65	ton/cm <sup>3</sup>
Coefficiente de variación:	0.256	

### MURETES

Asimismo, se construyeron 18 muretes, nueve con la primera combinación y los nueve restantes con la segunda combinación, figura A.4. En las tablas A.22 y A.23 se muestran las resistencias al corte y el módulo de rigidez al corte para ambos arreglos.

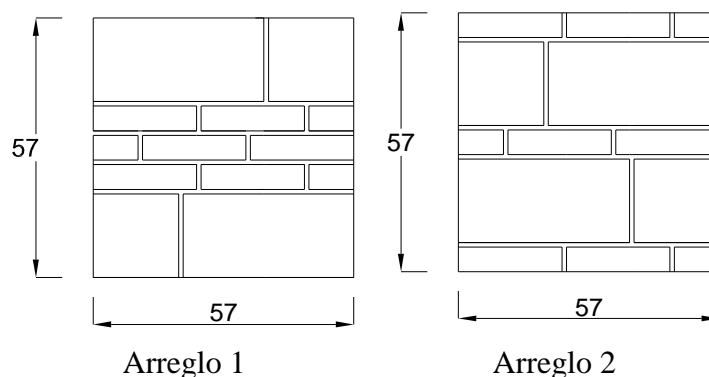


Figura A.4. Combinaciones de muretes ensayados.

**Tabla A.22. Muretes arreglo 1**

Muretes	Dimensiones cm		Área Cm	Carga kg	$\tau$ kg/cm <sup>2</sup>	G kg/cm <sup>2</sup>
	t	Diagonal				
1	12	82	984	2481.3	2.52	5480.9
2	12	82	984	3208.5	3.26	2352.7
3	12	82	984	-	-	-
4	12	82	984	3581.13	3.64	6001.6
5	12	82	984	3772	3.83	4915.05
6	12	82	984	3163.02	3.21	3488.02
7	12	82	984	1436.1	1.46	3270.5
8	12	82	984	2035.9	2.07	3349.8
9	12	82	984	2472.25	2.51	5193.15

**Resistencia a compresión diagonal**

Esfuerzo medio:	2.81	kg/cm <sup>2</sup>
Desviación estándar:	0.81	kg/cm <sup>2</sup>
Coeficiente de variación:	0.29	
Resistencia de diseño ( $v_m^*$ ):	1.63	kg/cm <sup>2</sup>

**Módulo de rigidez a corte**

Esfuerzo medio:	4256.47	kg/cm <sup>2</sup>
Desviación estándar:	1301.9	kg/cm <sup>2</sup>
Coeficiente de variación:	0.306	

**Tabla A.23. Muretes arreglo 2**

Muretes	Dimensiones cm		Área kg	Carga kg	$\tau$ kg/cm <sup>2</sup>	G kg/cm <sup>2</sup>
	t	Diagonal				
1	12	82	984	1724.96	1.75	3921.2
2	12	82	984	1876.12	1.90	3265.8
3	12	82	984	4321.3	4.39	3390.4
4	12	82	984	3521.06	3.58	3458.12
5 <sup>1</sup>	12	82	984	-	-	-
6	12	82	984	1209.25	1.23	3199.9
7	12	82	984	2640.8	2.68	2254.7
8	12	82	984	2151.8	2.18	2610.1
9 <sup>1</sup>	12	82	984	-	-	-

<sup>1</sup> Estos muretes se despegaron antes de ser ensayados.

**Resistencia a compresión diagonal**

Esfuerzo medio:	2.53	kg/cm <sup>2</sup>
Desviación estándar:	1.11	kg/cm <sup>2</sup>
Coeficiente de variación:	0.43	
Resistencia de diseño ( $v_m^*$ ):	1.21	kg/cm <sup>2</sup>

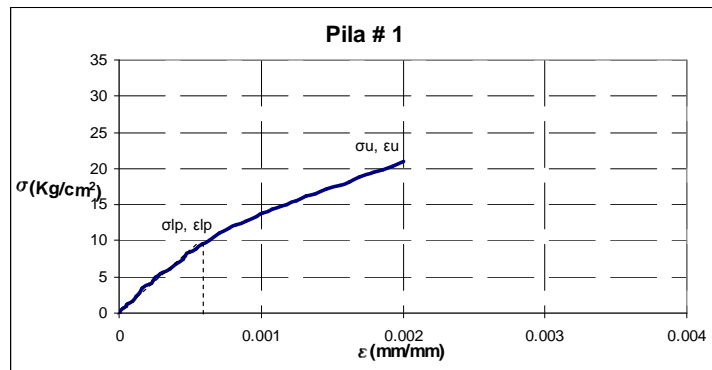
**Módulo de rigidez a corte**

Esfuerzo medio:	3200.1	kg/cm <sup>2</sup>
Desviación estándar:	481.6	kg/cm <sup>2</sup>
Coeficiente de variación:	0.15	

# APÉNDICE B

En este apéndice se presentan las graficas e imágenes de los modos de falla de las pilas y de los muretes ensayados en esta investigación.

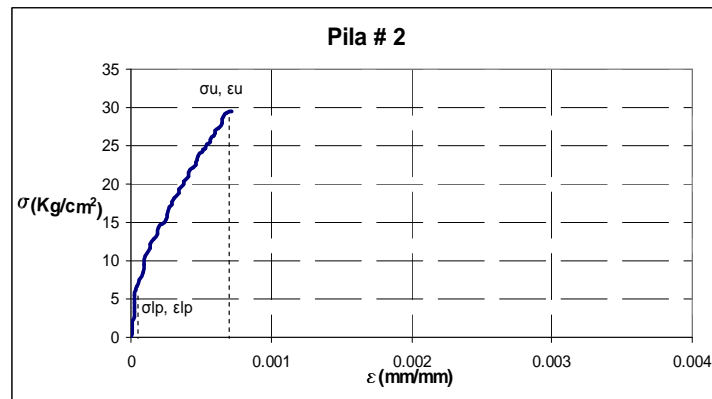
## B.1. PILAS, PRIMER ARREGLO



**Pila 1.**

**Módulo de Elasticidad  $E_m = 15,668.8 \text{ kg/cm}^2$ .**

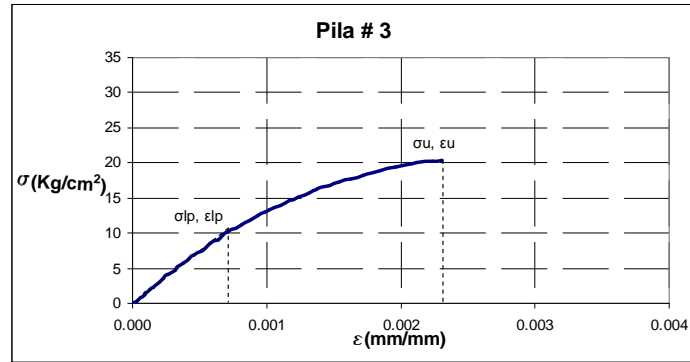
Observaciones. Aplastamiento del bloque inferior.



**Pila 2.**

**Módulo de Elasticidad  $E_m = 53,815 \text{ kg/cm}^2$ .**

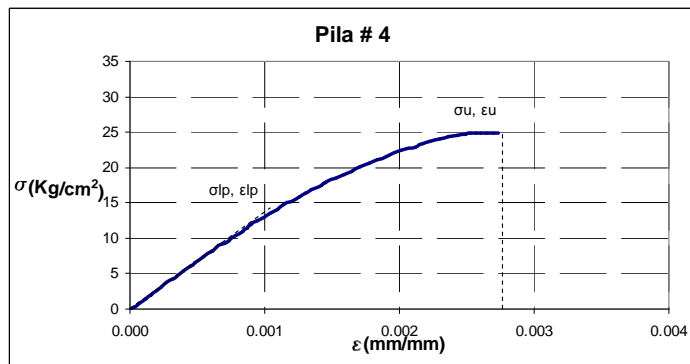
Observaciones. El agrietamiento comenzó en el tabique.



**Pila # 3.**

**Módulo de Elasticidad  $E_m=14,888.9 \text{ kg/cm}^2$ .**

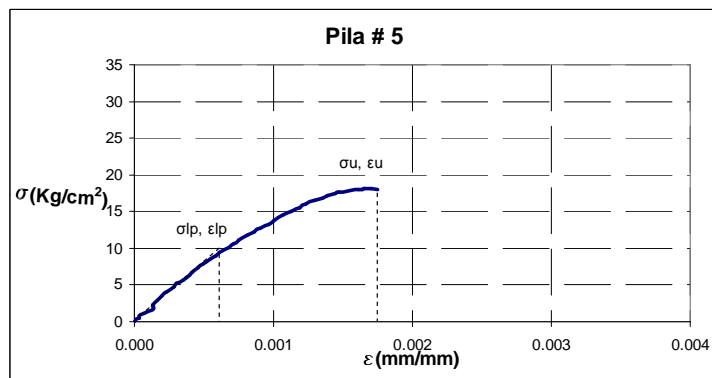
Observaciones. El agrietamiento comenzó en las piezas de tabique.



**Pila # 4.**

**Módulo de Elasticidad  $E_m=13,593.8 \text{ kg/cm}^2$ .**

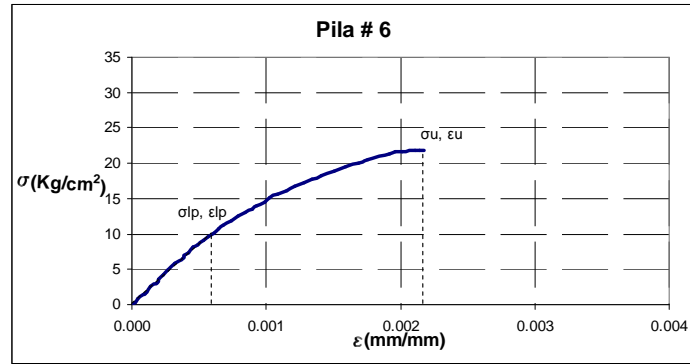
Observaciones. El agrietamiento comenzó en el tabique.



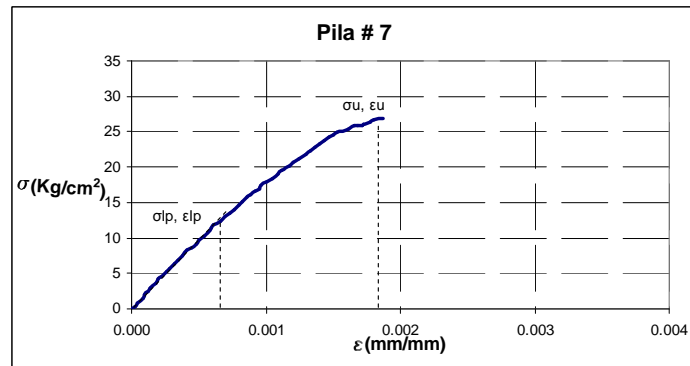
**Pila # 5.**

**Módulo de Elasticidad  $E_m=15,839.6 \text{ kg/cm}^2$ .**

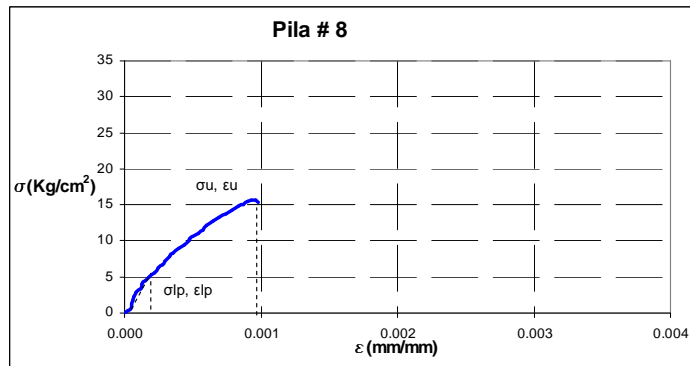
Observaciones. Ocurrió aplastamiento del bloque.



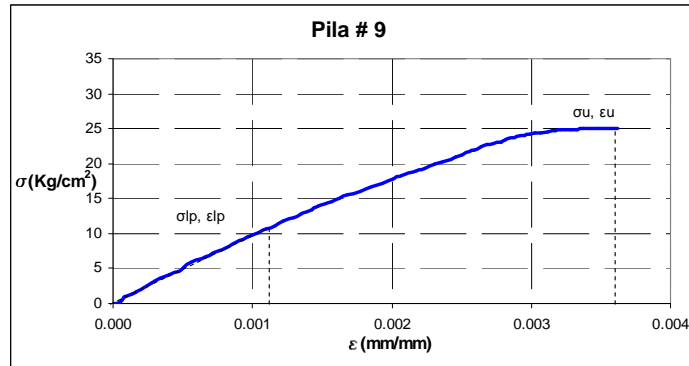
**Pila 6.**  
**Módulo de Elasticidad  $E_m = 17,188.7 \text{ kg/cm}^2$ .**  
 Observaciones. Aplastamiento del bloque superior.



**Pila 7.**  
**Módulo de Elasticidad  $E_m = 19249.8 \text{ kg/cm}^2$ .**  
 Observaciones. Agrietamiento vertical.



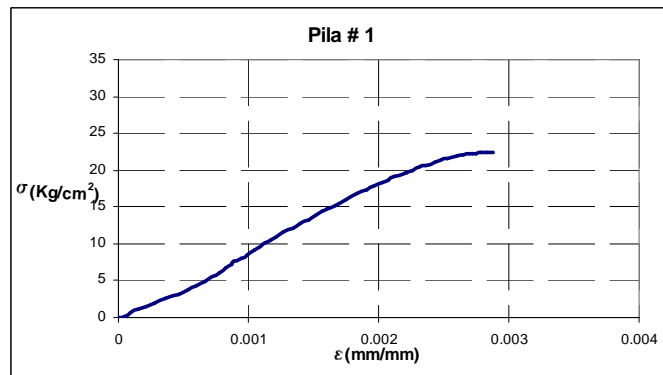
**Pila 8.**  
**Módulo de Elasticidad  $E_m = 24,338.9 \text{ kg/cm}^2$ .**  
 Observaciones. Aplastamiento del bloque.



**Pila 9.**

**Módulo de Elasticidad  $E_m = 10,108.5 \text{ kg/cm}^2$ .**  
Observaciones. Aplastamiento del bloque superior.

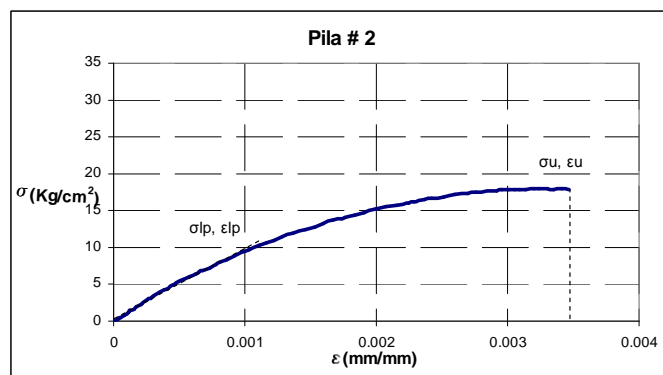
## B.2. PILAS, SEGUNDO ARREGLO



**Pila 1.**

**Módulo de Elasticidad  $E_m = 8,979.1 \text{ kg/cm}^2$ .**

Observaciones. Agrietamiento vertical y aplastamiento del bloque superior. No se considerará para el cálculo del módulo de elasticidad, debido a que la primera parte es menos rígida que la segunda parte, después de la carga de  $5 \text{ kg/cm}^2$ , poco realista.

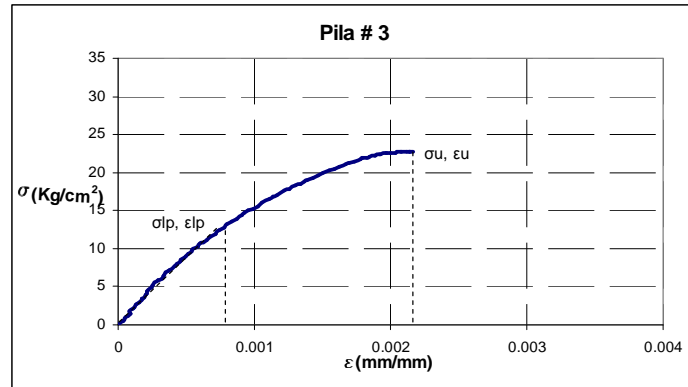


**Pila 2.**

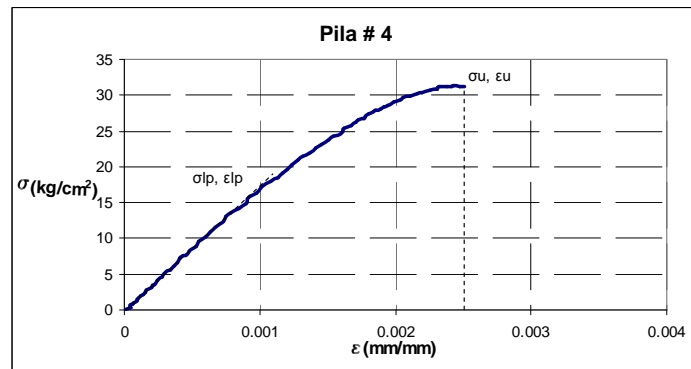
**Módulo de Elasticidad  $E_m = 10,209.7 \text{ cm}^2$ .**

Observaciones. La falla comenzó con el aplastamiento del bloque.

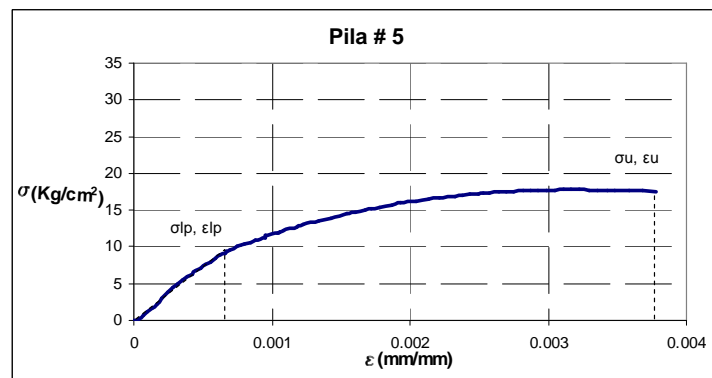




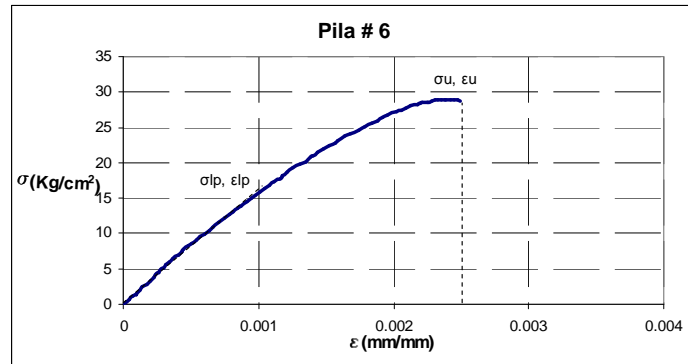
**Pila 3.**  
**Módulo de Elasticidad  $E_m = 18,411.5 \text{ kg/cm}^2$ .**  
 Observaciones. Aplastamiento del bloque superior.



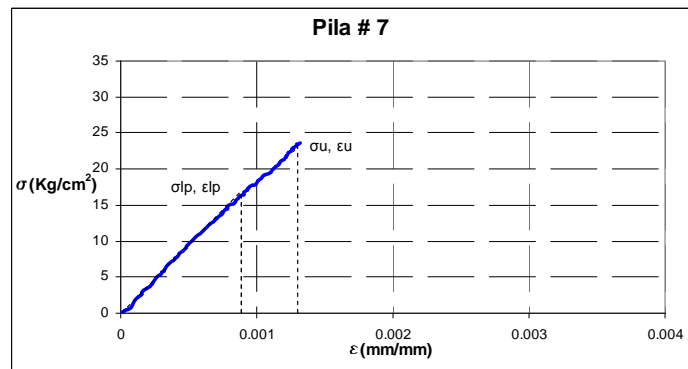
**Pila 4.**  
**Módulo de Elasticidad  $E_m = 17,289.4 \text{ kg/cm}^2$ .**  
 Observaciones. Aplastamiento del bloque superior.



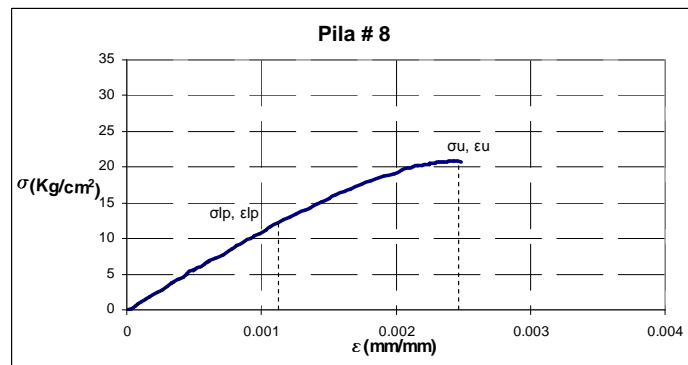
**Pila 5.**  
**Módulo de Elasticidad  $E_m = 15,654.6 \text{ kg/cm}^2$ .**  
 Observaciones. El agrietamiento comenzó en el bloque, seguido de su aplastamiento.



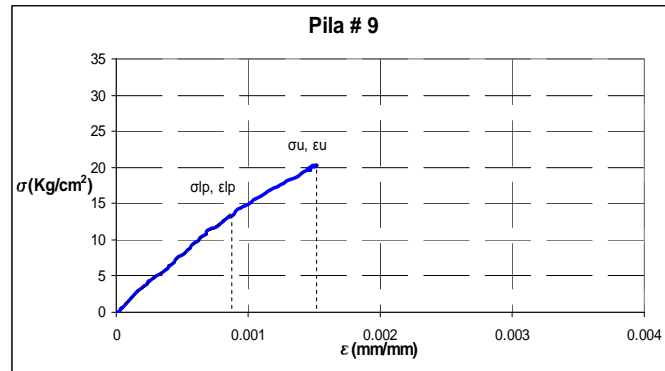
**Pila 6.**  
**Módulo de Elasticidad  $E_m = 16,442.6 \text{ kg/cm}^2$ .**  
 Observaciones. Agrietamiento vertical.



**Pila 7.**  
**Módulo de Elasticidad  $E_m = 19,769.7 \text{ kg/cm}^2$ .**  
 Observaciones. Agrietamiento vertical.



**Pila 8.**  
**Módulo de Elasticidad  $E_m = 11,187.7 \text{ kg/cm}^2$ .**  
 Observaciones. Agrietamiento vertical.

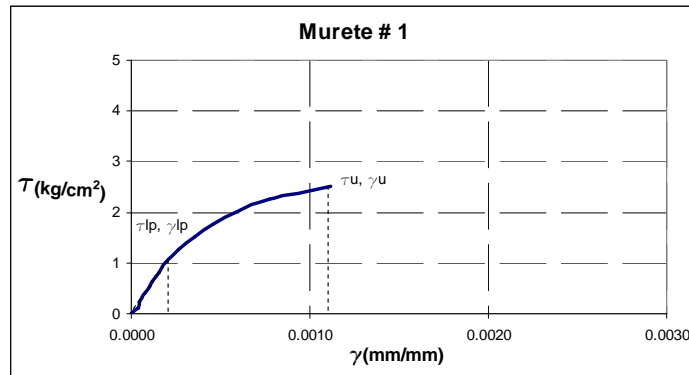
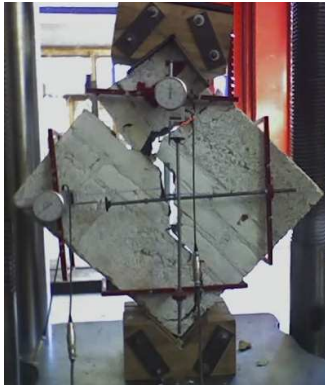


**Pila 9.**

**Módulo de Elasticidad  $E_m = 15,900.9 \text{ kg/cm}^2$ .**

Observaciones. Agrietamiento vertical y aplastamiento del bloque superior.

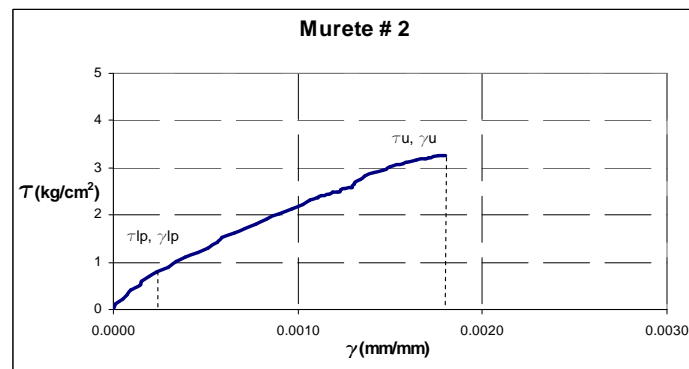
### B.3. MURETES, PRIMER ARREGLO



**Murete 1.**

**Módulo de Rigidez a Corte  $G_m = 5,480.9 \text{ kg/cm}^2$ .**

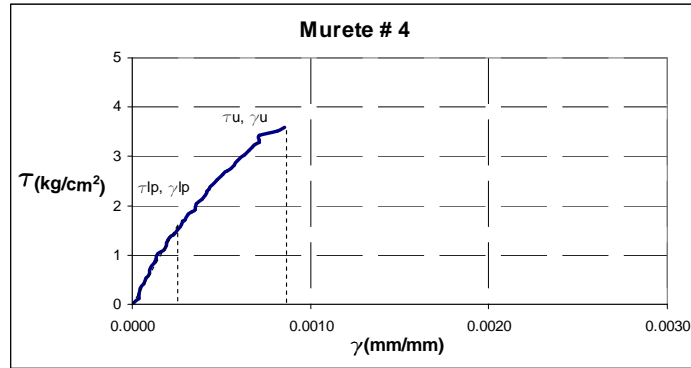
Observaciones. Algunas de las piezas se deslizaron.



**Murete 2.**

**Módulo de Rigidez a Corte  $G_m = 2,352.7 \text{ kg/cm}^2$ .**

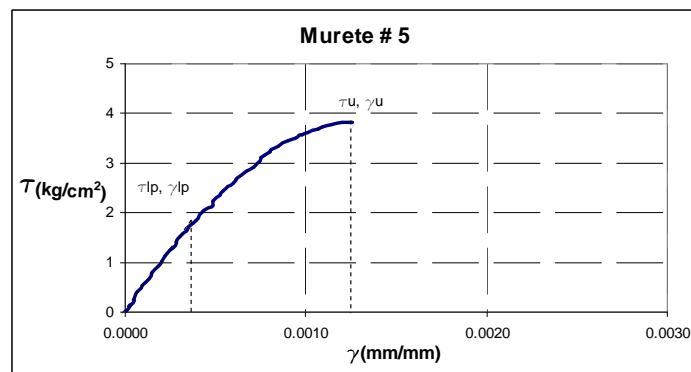
Observaciones. Agrietamiento en la diagonal a compresión.



**Murete 4.**

**Módulo de Rigidez a Corte  $G_m = 6,001.6 \text{ kg/cm}^2$ .**

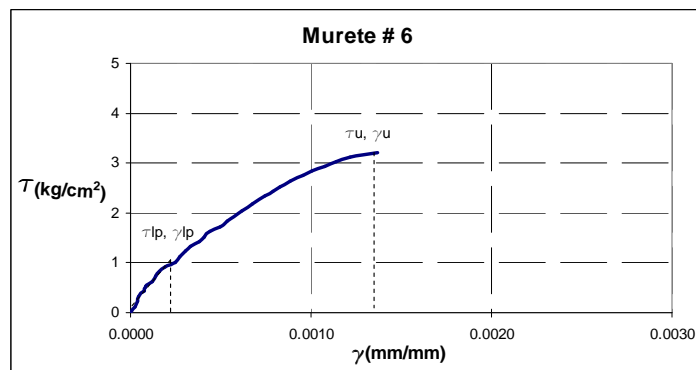
Observaciones. El agrietamiento siguió las juntas de las piezas.



**Murete 5.**

**Módulo de Rigidez a Corte  $G_m = 4,915.05 \text{ kg/cm}^2$ .**

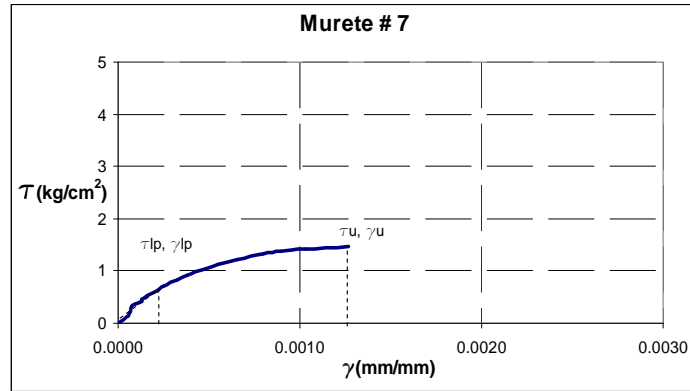
Observaciones. Ocurrió una falla súbita.



**Murete 6.**

**Módulo de Rigidez a Corte  $G_m = 3,488.02 \text{ kg/cm}^2$ .**

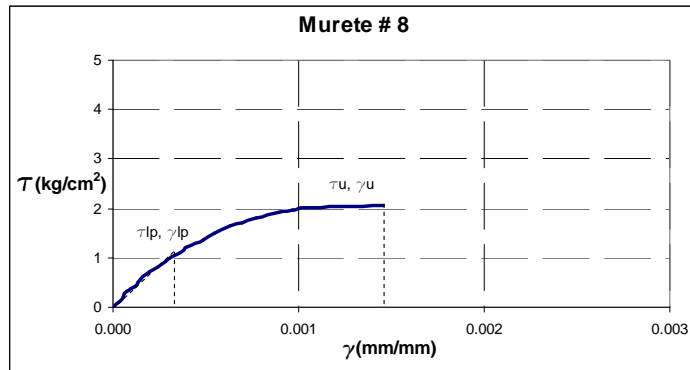
Observaciones. Ocurrió una falla súbita.



**Murete 7.**

**Módulo de Rigidez a Corte  $G_m = 3,270.4 \text{ kg/cm}^2$ .**

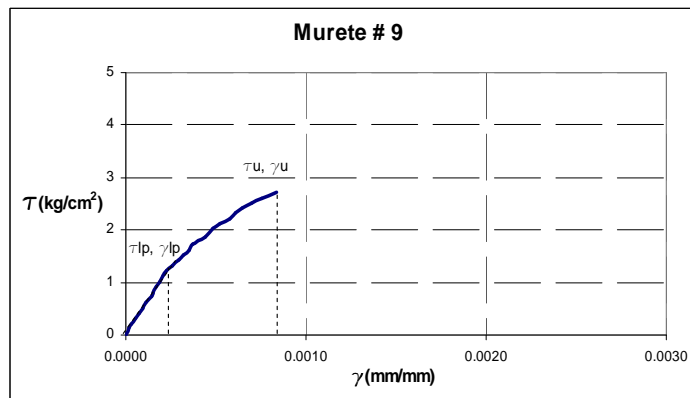
Observaciones. Se despegó una pieza en el traslado, se reparó y se ensayó.



**Murete 8.**

**Módulo de Rigidez a Corte  $G_m = 3,349.7 \text{ kg/cm}^2$ .**

Observaciones. Uno de los bloques se despegó, se reparó y se probó nuevamente.

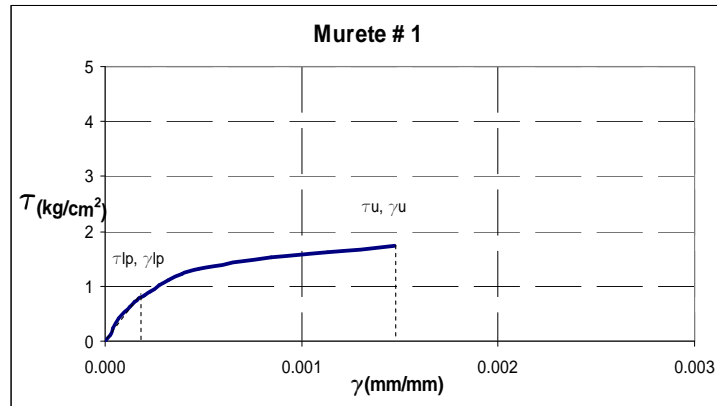


**Murete 9.**

**Módulo de Rigidez a Corte  $G_m = 5193.1 \text{ kg/cm}^2$ .**

Observaciones. Falló por adherencia en las piezas.

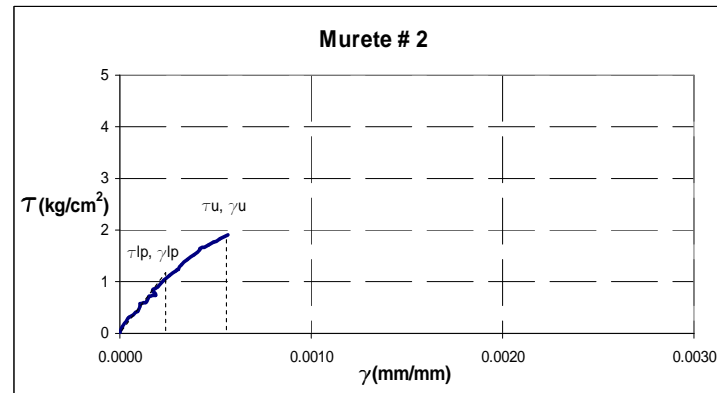
## B.4. MURETES, SEGUNDO ARREGLO



**Murete 1.**

**Módulo de Rigidez a Corte  $G_m = 3,921.2 \text{ kg/cm}^2$ .**

Observaciones. Agrietamiento a lo largo de la diagonal a compresión.



**Murete 2.**

**Módulo de Rigidez a Corte  $G_m = 3,265.8 \text{ kg/cm}^2$ .**

Observaciones. Falló por deslizamiento de las piezas.

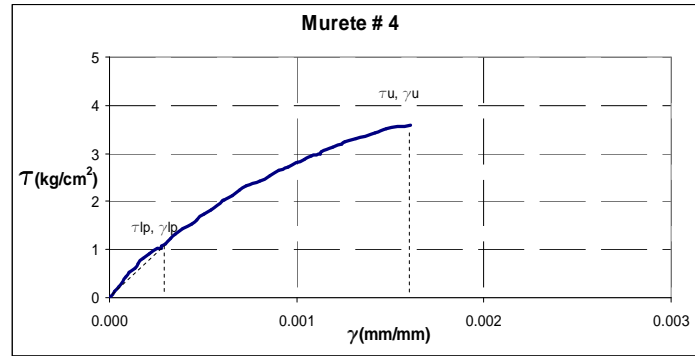
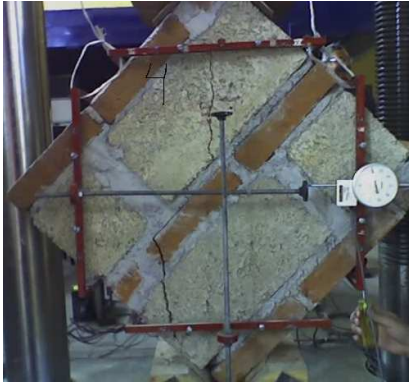


**Murete 3.**

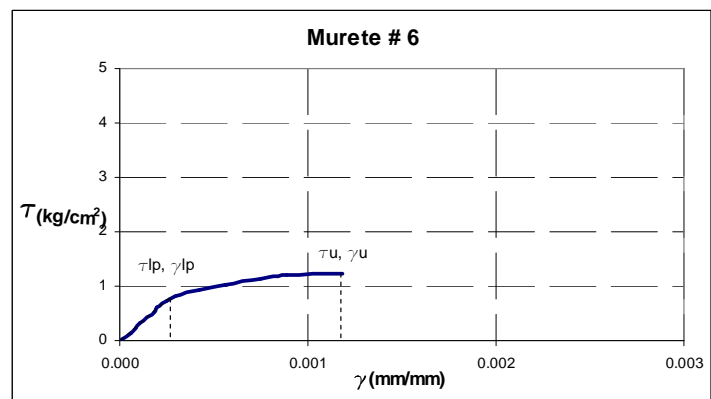
**Módulo de Rigidez a Corte  $G_m = 3,390.4 \text{ kg/cm}^2$ .**

Observaciones. Falló por adherencia.

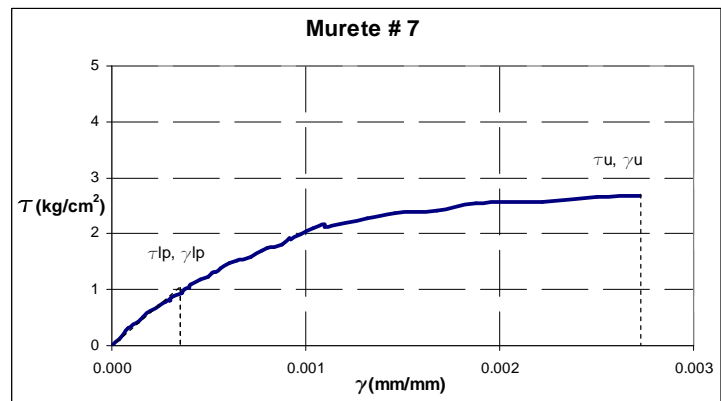
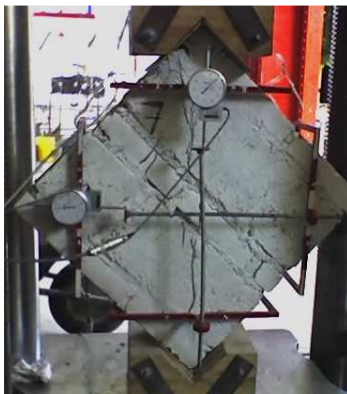




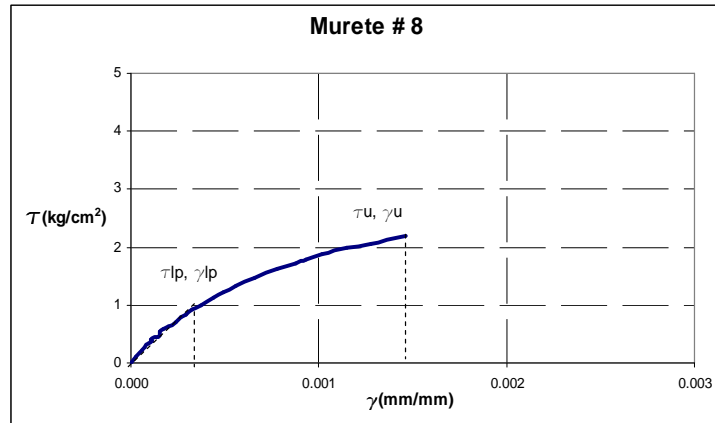
**Murete 4.**  
**Módulo de Rigidez a Corte  $G_m = 3,458.12 \text{ kg/cm}^2$ .**  
 Observaciones.



**Murete 6.**  
**Módulo de Rigidez a Corte  $G_m = 3,199.8 \text{ kg/cm}^2$ .**  
 Observaciones.



**Murete 7.**  
**Módulo de Rigidez a Corte  $G_m = 2,254.7 \text{ kg/cm}^2$ .**  
 Observaciones.



**Murete 8.**  
**Módulo de Rigidez a Corte  $G_m = 2,610.1 \text{ kg/cm}^2$ .**  
 Observaciones.



# APÉNDICE C

## DETERMINACION DE LOS MÓDULOS DE RESILIENCIA Y MÓDULOS DE TENACIDAD PARA PILAS Y MURETES.

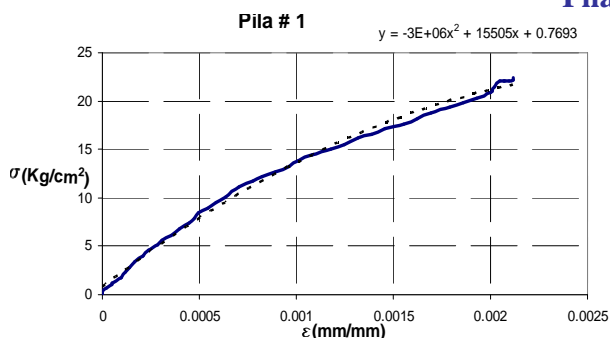
En este apéndice se muestran los valores del módulo de resiliencia y el módulo de tenacidad para las pilas y los muretes con el primer y el segundo arreglo seleccionado.

Se muestran las graficas obtenidas en el laboratorio, la curva ajustada y su correspondiente ecuación.

Los módulos de resiliencia y de tenacidad fueron obtenidos mediante la integración de la ecuación de la curva ajustada, en el caso del módulo de resiliencia hasta el rango elástico y en el caso de el modulo de tenacidad hasta la falla de la probeta.

### C.1. PILAS ARREGLO-1

#### Pila 1



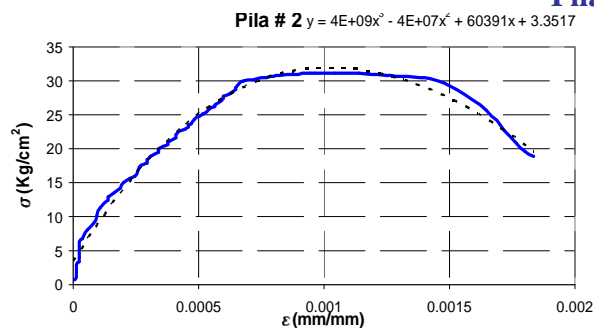
Módulo de resiliencia

$$U_r = 0.0075 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$

Módulo de tenacidad.

$$U_T = 0.0265 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$

#### Pila 2



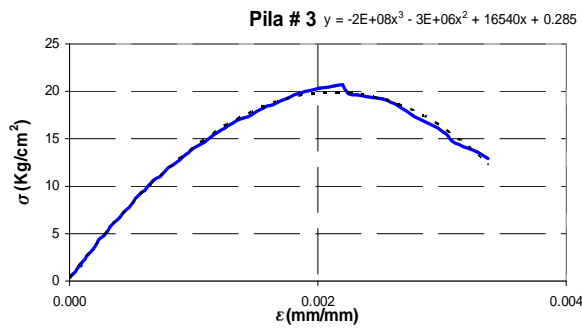
Módulo de resiliencia

$$U_r = 0.0025 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$

Módulo de tenacidad.

$$U_T = 0.036 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$

### Pila 3



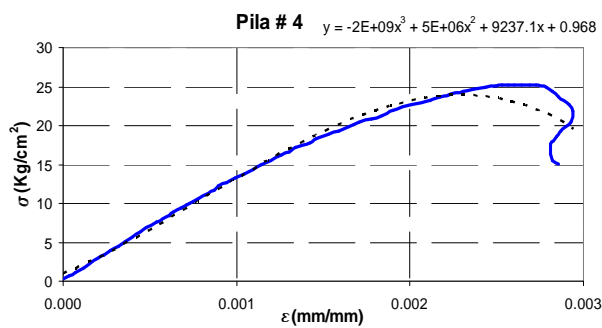
Módulo de  
resiliencia

$$U_r = 0.00265 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$

Módulo de  
tenacidad.

$$U_T = 0.052 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$

### Pila 4



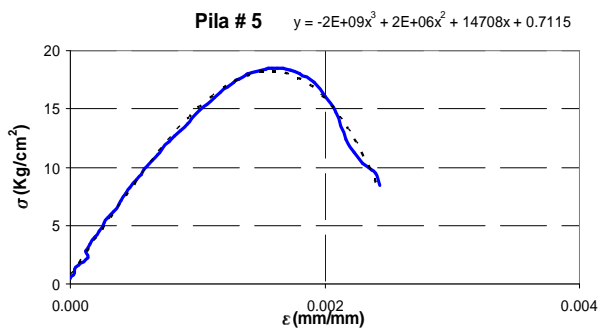
Módulo de  
resiliencia

$$U_r = 0.013 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$

Módulo de  
tenacidad.

$$U_T = 0.047 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$

### Pila 5



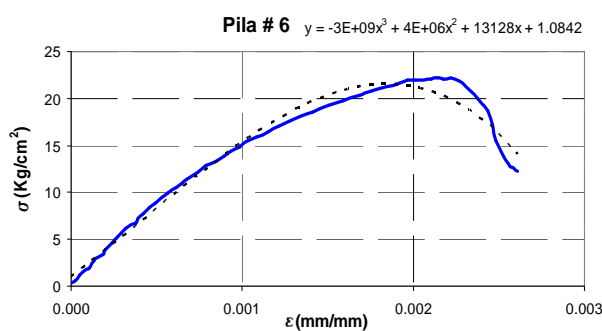
Módulo de  
resiliencia

$$U_r = 0.0054 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$

Módulo de  
tenacidad.

$$U_r = 0.03863 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$

### Pila 6



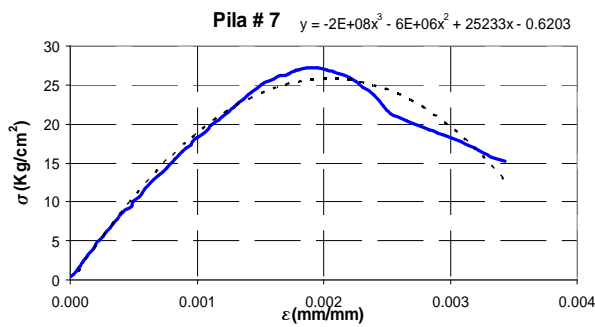
Módulo de  
resiliencia

$$U_r = 0.0082 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$

Módulo de  
tenacidad.

$$U_T = 0.0363 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$

### Pila 7



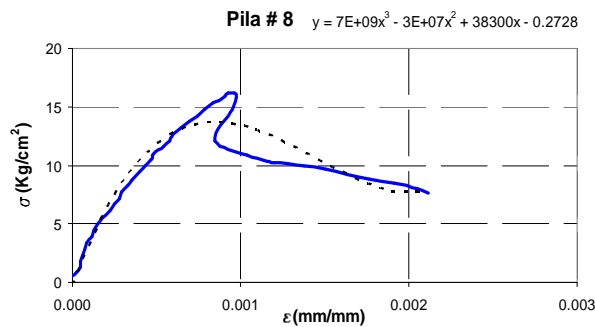
Módulo de  
resiliencia

$$U_r = 0.0059 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$

Módulo de  
tenacidad.

$$U_T = 0.058 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$

### Pila 8



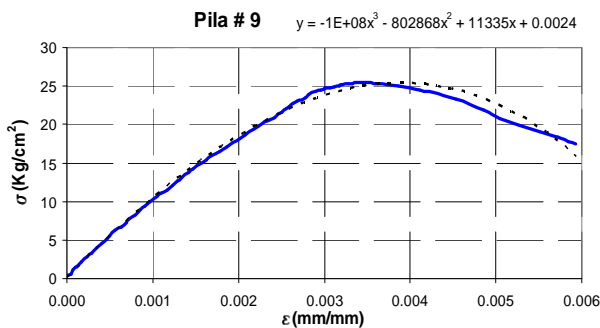
Módulo de  
resiliencia

$$U_r = 0.00165 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$

Módulo de  
tenacidad.

$$U_r = 0.0253 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$

### Pila 9



Módulo de  
resiliencia

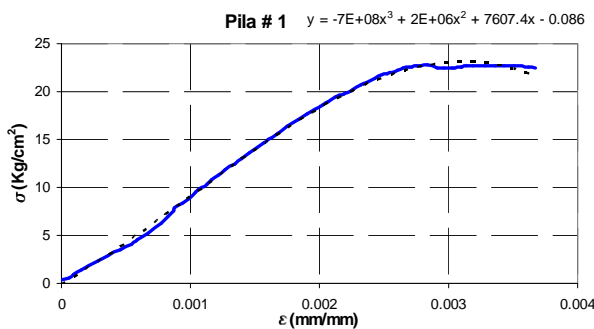
$$U_r = 0.0103 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$

Módulo de  
tenacidad.

$$U_T = 0.1120 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$

## C.2. PILAS ARREGLO-2

### Pila 1



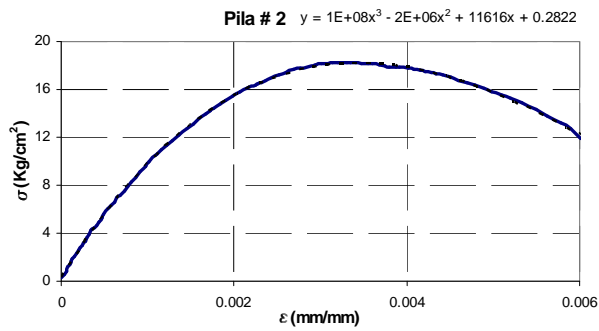
Módulo de  
resiliencia

$$U_r = 0.021 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$

Módulo de  
tenacidad.

$$U_r = 0.0527 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$

### Pila 2



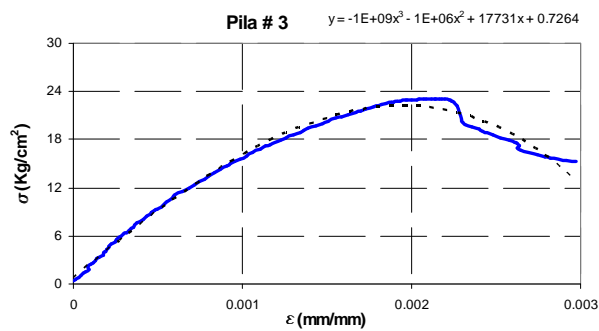
Módulo de resiliencia

$$U_r = 0.0076 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$

Módulo de tenacidad.

$$U_T = 0.0992 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$

### Pila 3



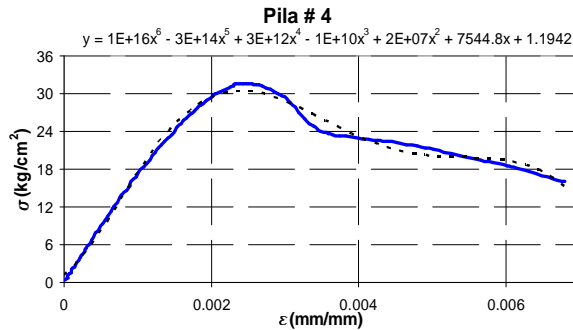
Módulo de resiliencia

$$U_r = 0.00668 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$

Módulo de tenacidad.

$$U_T = 0.051 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$

### Pila 4



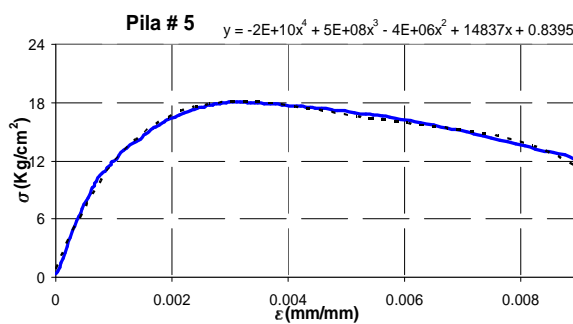
Módulo de resiliencia

$$U_r = 0.0193 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$

Módulo de tenacidad.

$$U_T = 1.67 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$

### Pila 5



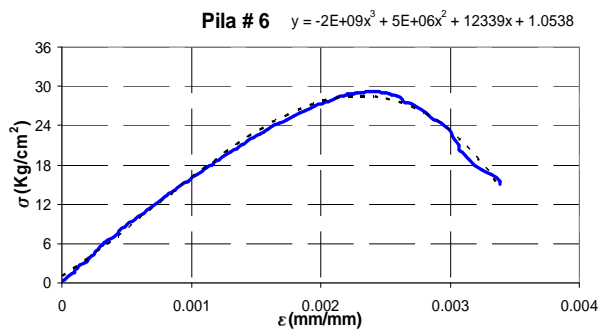
Módulo de resiliencia

$$U_r = 0.00532 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$

Módulo de tenacidad.

$$U_T = 0.199 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$

### Pila 6



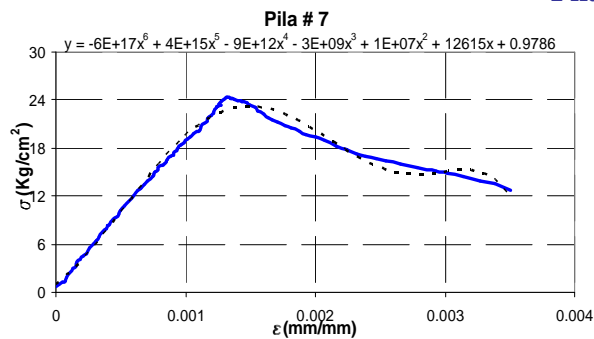
Módulo de  
resiliencia

$$U_r = 0.0162 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$

Módulo de  
tenacidad.

$$U_T = 0.0735 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$

### Pila 7



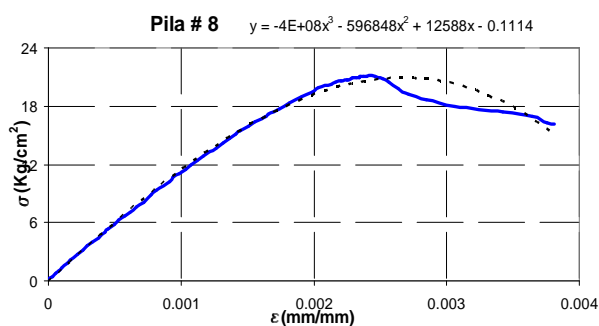
Módulo de  
resiliencia

$$U_r = 0.0072 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$

Módulo de  
tenacidad.

$$U_T = 0.16 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$

### Pila 8



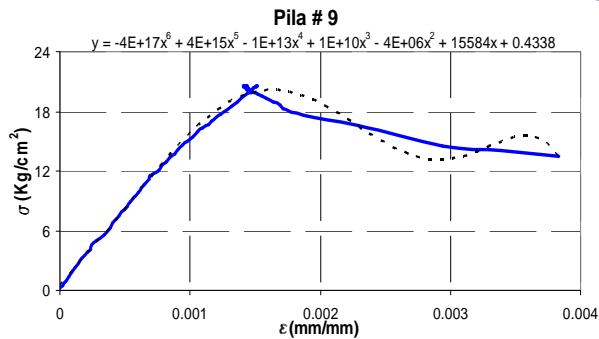
Módulo de  
resiliencia

$$U_r = 0.0086 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$

Módulo de  
tenacidad.

$$U_T = 0.0595 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$

### Pila 9



Módulo de  
resiliencia

$$U_r = 0.0071 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$

Módulo de  
tenacidad.

$$U_T = 0.331 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$

### C.3. MURETES, PRIMER ARREGLO

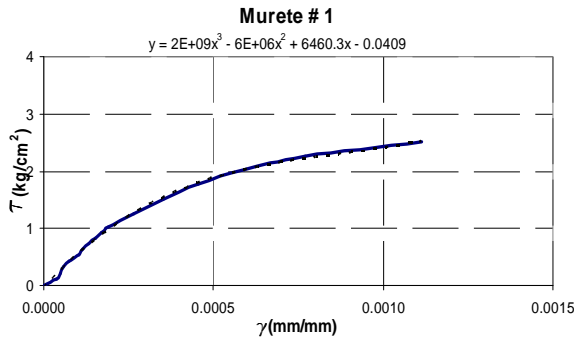
#### Murete 1

Módulo de resiliencia

Módulo de tenacidad.

$$U_r = 0.000106 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

$$U_T = 0.00193 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$



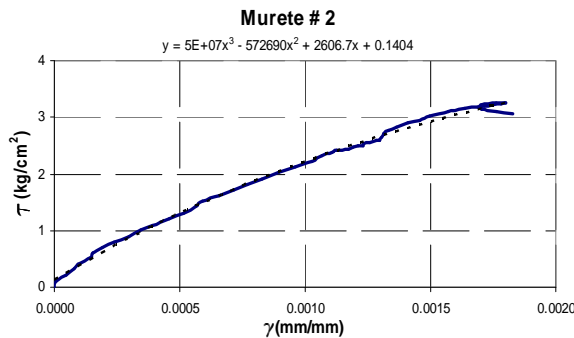
#### Murete 2

Módulo de resiliencia

Módulo de tenacidad.

$$U_r = 0.0005138 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

$$U_T = 0.003585 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$



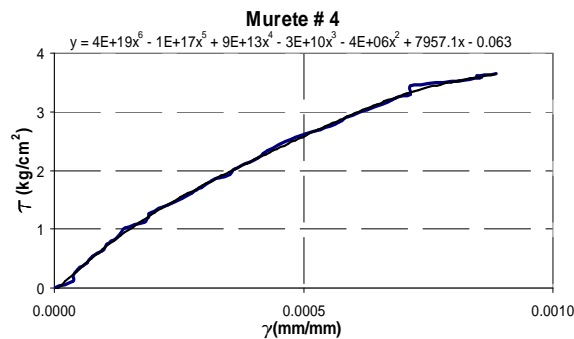
#### Murete 4

Módulo de resiliencia

Módulo de tenacidad.

$$U_r = 0.000128 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

$$U_T = 0.00177 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$



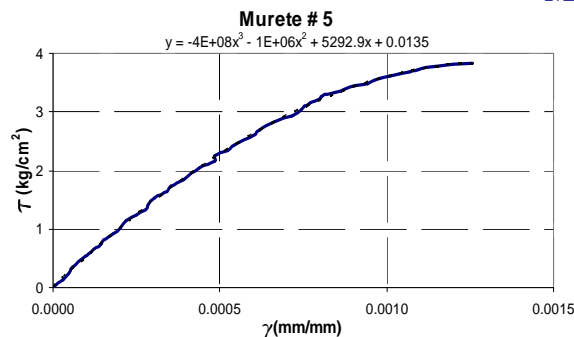
#### Murete 5

Módulo de resiliencia

Módulo de tenacidad.

$$U_r = 0.0002324 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

$$U_T = 0.003256 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$



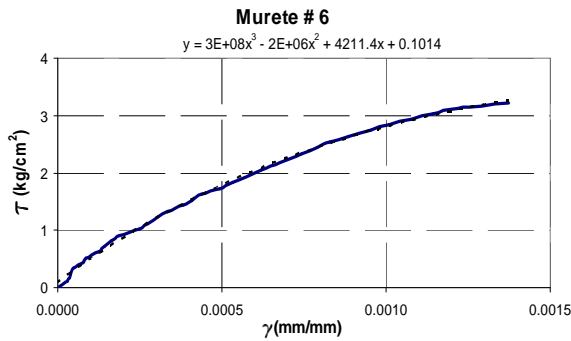
### Murete 6

Módulo de resiliencia

Módulo de tenacidad.

$$U_r = 0.0001681 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$

$$U_T = 0.002641 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$



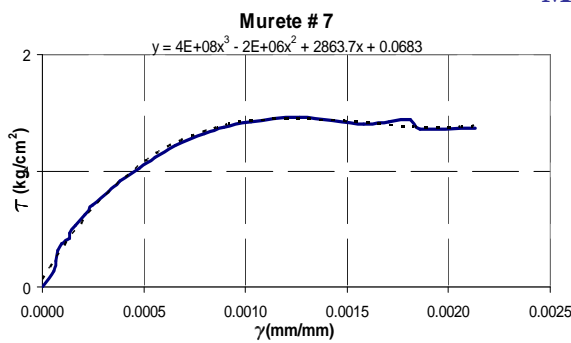
### Murete 7

Módulo de resiliencia

Módulo de tenacidad.

$$U_r = 0.0000965 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$

$$U_T = 0.00223 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$



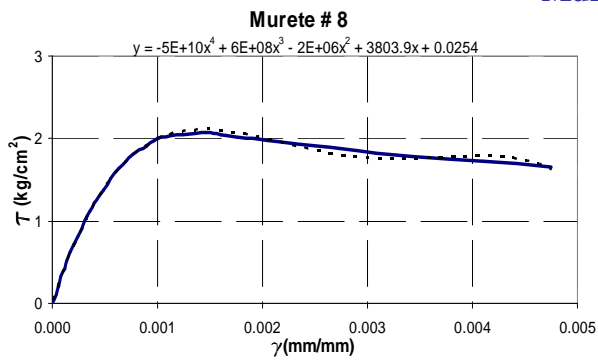
### Murete 8

Módulo de resiliencia

Módulo de tenacidad.

$$U_r = 0.000215 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$

$$U_T = 0.0232 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$



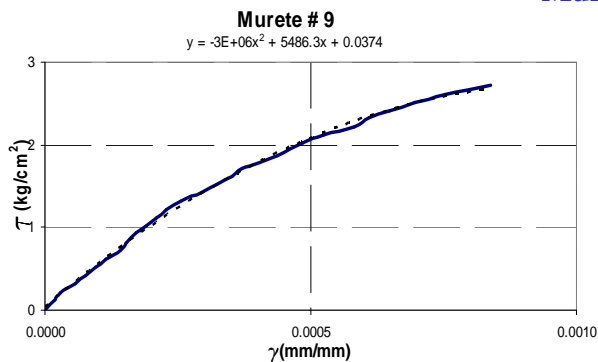
### Murete 9

Módulo de resiliencia

Módulo de tenacidad.

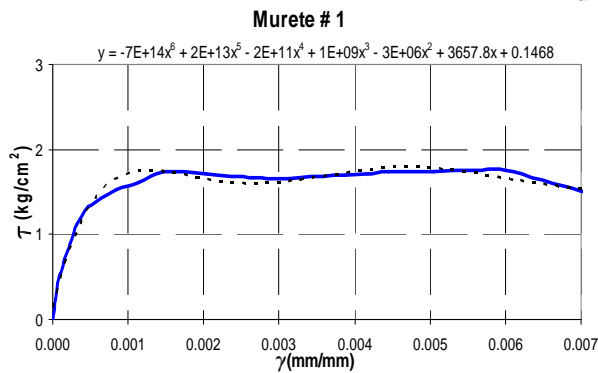
$$U_r = 0.00019 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$

$$U_T = 0.00137 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$



## C.4. MURETES SEGUNDO ARREGLO

### Murete 1



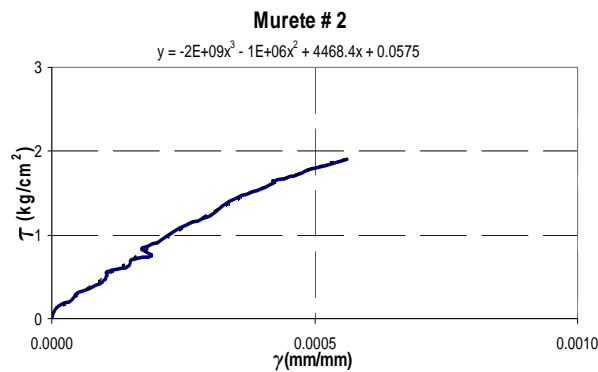
Módulo de resiliencia

$$U_r = 0.000293 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$

Módulo de tenacidad.

$$U_T = 0.014 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$

### Murete 2



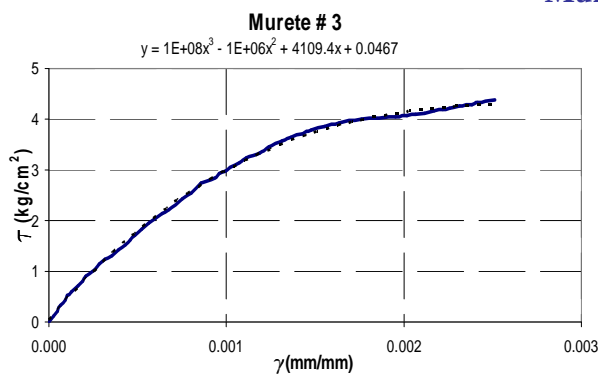
Módulo de resiliencia

$$U_r = 0.000169 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$

Módulo de tenacidad.

$$U_T = 0.000625 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$

### Murete 3



Módulo de resiliencia

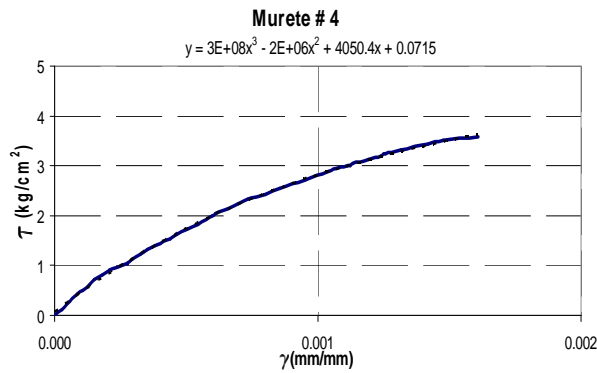
$$U_r = 0.000858 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$

Módulo de tenacidad.

$$U_T = 0.0087 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$



### Murete 4



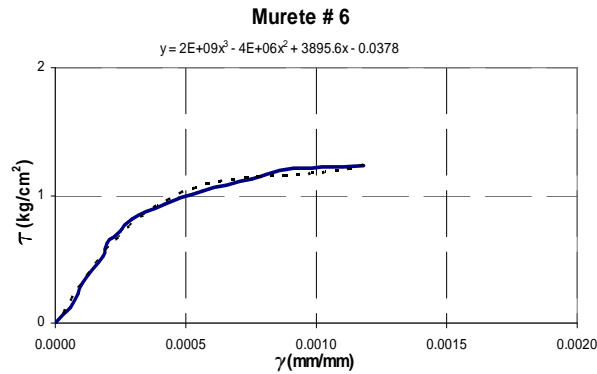
Módulo de resiliencia

$$U_r = 0.000355 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$

Módulo de tenacidad.

$$U_T = 0.00306 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$

### Murete 6



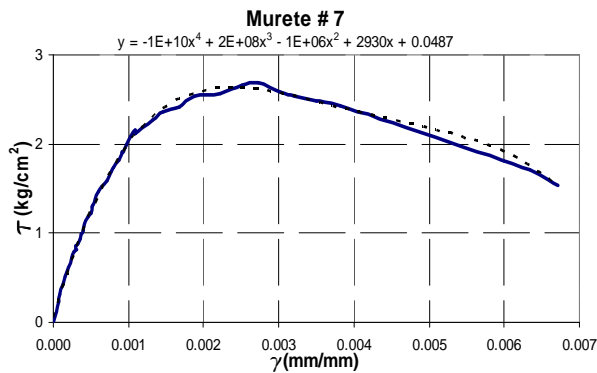
Módulo de resiliencia

$$U_r = 0.000124 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$

Módulo de tenacidad.

$$U_T = 0.00149 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$

### Murete 7



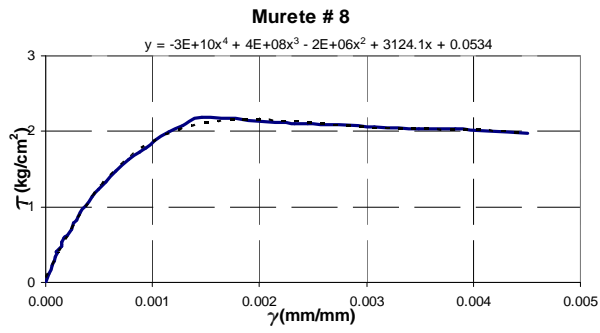
Módulo de resiliencia

$$U_r = 0.000666 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$

Módulo de tenacidad.

$$U_T = 0.0396 \frac{kg \cdot cm}{cm^3}$$

### Murete 8



Módulo de resiliencia

$$U_r = 0.00027062 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

Módulo de tenacidad.

$$U_T = 0.001056 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

## REFERENCIAS

- Aguilar G, S Alcocer y G Cano (1994), "Efectos del refuerzo horizontal en el comportamiento de muros de mampostería ante cargas laterales", *Memorias, IX Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, Zacatecas, Zacatecas, Volumen I, pp. 66-74.
- Aguilar, G y S Alcocer (1997), "Efecto del refuerzo horizontal en el comportamiento de muros de mampostería confinada ante cargas laterales", *Sistema Nacional de Protección Civil*, Centro Nacional de Prevención de Desastres, México.
- Aguilar G, G Cano y S Alcocer (1994), "Efecto del refuerzo horizontal en el comportamiento de muros de mampostería ante cargas laterales", *Memorias, IX Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, Zacatecas, Zacatecas Vol. I, pp. 66-74.
- Ambrose, J (1999), *Simplified Design of Masonry Structures*, Wiley Interscience Publications, Estados Unidos.
- Arnal, S y M Betancourt (1999), *Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal*, cuarta edición, Trillas, México.
- ASTM-74 (1974), "Masonry, past and present", ASTM Special Technical Publications, American Society for Testing of Materials.
- Bazán y Meli (2004), *Diseño sísmico de edificios*, Limusa, México.
- Beall, C (1993), *Masonry design and detailing*, tercera edición, McGraw-Hill, Estados Unidos.
- "Comisión nacional de vivienda" (2007), "Publicaciones", <http://www.conafovi.gob.mx/publicaciones/Mampostería>
- Esteva, L (1961), "Muros de mampostería sujetos a carga vertical", *Informe Interno*, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México, octubre.
- Flores, L, Alcocer SM. Estudio analítico de estructuras de mampostería confinada. Reporte técnico, Coordinación de investigación, Área de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Cenapred. 2001.
- Flores, L, A Mendoza, C Reyes y M Pacheco (2003), "Ensayo de muros de mampostería con aberturas y su rehabilitación con malla y mortero", *Sistema Nacional de Protección Civil*, Centro Nacional de Prevención de Desastres, México.
- Flores, L, A Mendoza y C Reyes (2004), "Ensayo de muros de mampostería con y sin refuerzo alrededor de la abertura", *Memorias, XIV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, Acapulco, Guerrero, noviembre, CD-ROM, pp. 1-11.
- Flores, L (2004). Comunicación personal.
- Gobierno del Distrito Federal (2004) "Normas Técnicas para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería", México, 21pp.
- Hernández, O y R Meli (1976), "Modalidades del refuerzo para mejorar el comportamiento sísmico de muros de mampostería", *Informe 382*, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México, diciembre.
- Hernández, O, R Meli, M Padilla y E Valencia (1979), "Refuerzo de vivienda rural en zonas sísmicas", *Informe 441*, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México, agosto.
- Hibbeler, R C (1998), *Mecánica de materiales*, tercera edición, Pretince Hall, México, pp. 85-99
- Juárez, A (2007), "Mecanismos de resistencia y deformación de muros de mampostería combinada y confinada", *Tesis de maestría*, UAM, México, DF., 154 pp.
- Kwok Y-H, Ang AH-S. Seismic damage análisis and design of unreinforced masonry buildings, Structural research series no. 536. University of Illinois at Urbana-Champaign, June 1987.
- "La enciclopedia libre" (2007), "Wikipedia", <http://es.wikipedia.org/wiki/Energ>

- Meli, R, A Zeevaert y L Esteva (1968), “Comportamiento de muros de mampostería hueca ante carga lateral alternada”, *Informe 156*, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México, julio.
- Meli, R y G Salgado (1969), “Comportamiento de muros de mampostería sujetos a carga lateral”, *Segundo Informe Interno*, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México, septiembre.
- Meli, R y A Reyes (1971), “Propiedades mecánicas de mampostería”, *Informe 288*, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México, julio.
- Moreno, F (1991), *Técnicas de la construcción con ladrillo*, Monografías CEAC de la construcción, España.
- Norma mexicana NMX-C-404-ONNCCE (1997), “Industria de la construcción-bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso estructural-especificaciones y métodos de prueba”, Norma Mexicana, 9pp.
- NTCM-2004 (2004) “Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería”, *Gaceta Oficial del Departamento del Distrito Federal*, México, octubre.
- ONNCCE (2006), “Determinación de la resistencia a compresión diagonal y rigidez a cortante de muretes y la resistencia a compresión y módulo de elasticidad de pilas de mampostería de barro o de concreto-Método de prueba”, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, México, 12 pp. (en consulta publica)
- Reese, R y B Thurlimann (1978), *Structural Design of Tall Concrete and Masonry Buildings*, primera edición, group editors, Mac Gregor James, I Lyse , New York American Society of Civil Engineers, Estados Unidos.
- Ruiz, J, T Sánchez y S Alcocer (1996), “Rehabilitación de muros de mampostería confinada mediante malla de alambre y recubrimiento de mortero”, *Centro Nacional de Prevención de Desastres*, México.
- Sahlin, S (1971), *Structural masonry*, Pretince Hall, Estados Unidos
- Schneider, R y W Dickey (1980), *Reinforced Masonry Design*, primera edición, Pretince-Hall, Estados Unidos.
- Tena, A., A Juárez y V H Salinas (2007), “Resistencia y deformación de muros de mampostería combinada y confinada sujetos a cargas laterales”, *Revista de Ingeniería Sísmica*, SMIS, No. 76, pp. 29-60, enero-junio.
- Tena, A (2004) “Apuntes de estructuras de mampostería”, UAM Azcapotzalco, México
- Tena, A (2006) “Apuntes de análisis estructural avanzado”, UAM Azcapotzalco, México
- “Universidad Nacional de Colombia” (2005), “Mampostería estructural”, <http://www.virtual.unal.edu.co>